

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského
inženýrství

Návrh a realizace snímače toxických plynů
s komunikací prostřednictvím protokolu
FINET

Design and Implementation of Toxic Gas
Sensors with Communication Protocol
FINET

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Luděk Dvořáček**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2601T004 Měřicí a řídicí technika

Téma: **Návrh a realizace snímače toxických plynů s komunikací prostřednictvím protokolu FINET**
Design and Implementation of Toxic Gas Sensors with Communication Protocol FINET

Zásady pro vypracování:

1. Nastudování problematiky měření toxických plynů.
2. Nastudování telemetrické stanice M4016 a komunikačního protokolu FINET.
3. Návrh a realizace elektroniky pro zpracování signálů ze snímače toxických plynů s možností komunikace se stanicí M4016.
4. Tvorba firmware pro elektroniku snímače.
5. Testování vytvořeného prototypu.
6. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] FIEDLER-MÁGR. *M4016 - Univerzální registrační a řídicí jednotka*. [online] Datasheet. České Budějovice: Fiedler-Mádr, 2009. [cit. 2013-10-20]. Dostupné z: <http://www.fiedler-magr.cz/>
- [2] FIEDLER-MÁGR. *APL-101 - Popis komunikačního protokolu FINET*. [online] Aplikace. České Budějovice: Fiedler-Mádr, 2009. [cit. 2013-10-20]. Dostupné z: <http://www.fiedler-magr.cz/>
- [3] FIGARO ENGINEERING Inc. *Technical Information for Combination Methane and Carbon Monoxide Sensors*. [online] Mino, Osaka: Figaro Engineering Inc., 2012. [cit. 2013-10-20]. Dostupné z: <http://www.figarosensor.com/products/3870Dtl.pdf>
- [4] BRTNÍK, Bohumil A David MATOUŠEK. *Algoritmy číselového zpracování signálů*. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-400-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Pieš, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Martina
Pieše, Ph.D.*

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.


.....
Bc. Luděk Dvořáček

Datum odevzdání bakalářské práce: 5. 5. 2014

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinovi Piešovi, Ph.D. za cenné rady, konzultace a připomínky spojené s mou prací.

Dále bych rád poděkoval své rodině za jejich podporu ve studiu.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá měřením dvou toxických plynů a to metanu (CH_4) a oxidu uhelnatého (CO) pomocí senzoru TGS3870. Po změření koncentrace daných plynů v ovzduší se údaje uloží do paměti mikroprocesoru a na vyžádání nadřazeného zařízení jsou odeslány danému zařízení. Komunikace probíhá pomocí protokolu FINET. Součástí práce je fyzicky hmatatelný a funkční prototyp. Prototyp má sloužit pro orientační měření, ale hardware je navržen jako univerzální a poskytuje tak široké možnosti rozšíření funkcí.

Klíčová slova

TGS3870, Metan, Oxid uhlelnatý, FINET, RS-485.

Abstract

This diploma work deals with the measurement of two toxic gases and this methane (CH_4) and carbon monoxide (CO) by a sensor TGS3870. After measuring the concentration of the gases in the atmosphere, the data stored in the microprocessor memory and on request of the master device are sent to the device. The communication protocol is FINET. Part of the work is physically tangible and functional prototype. The prototype is intended for indicative measurements, but hardware is designed to be universal and provides many possibilities extension functions.

Key words

TGS3870, Methan, Carbon Monoxide, FINET, RS-485.

Seznam použitých zkratk a symbolů

PWM – Pulse Width Modulation

RISC – Reduced Instruction Set Computing

CISC – Complex Instruction Set Computing

USART – Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter

PBT – polybutylen tereftalátu

A/D převodník – Analogově/Digitální převodník

DSP – Digitální Signálový Procesor

MCU – MicroController Unit

LSB – Least Significant Bit

MSB – Most Significant Bit

CPU – Central Processor Unit

SPI – Serial Peripheral Interface

ALU – Arithmetic Logic Unit

EEPROM – Electrically Erasable Programmable Read Only Memory

SRAM – Static Random Access Memory

DPS – Deska Plošných Spojů

CH₄ – Metan

CO – Oxid uhelnatý

A/D – Analogově Digitální

Obsah

1	ÚVOD	1
2	Měření plynů	2
2.1	Základní vlastnosti CO a Metanu	2
2.2	Figaro TGS 3870	2
3	Zpracování signálů	5
3.1	A/D převodník	5
3.2	Demultiplexor	8
3.3	PWM	9
4	Komunikace	11
4.1	UART	11
4.2	RS-485	14
4.3	Protokol FINET	15
4.4	Software MOST	19
5	ATmega 644P	20
5.1	Popis ATmega 644P	20
5.2	Popis použitých periférií	21
6	Návrh Hardware	23
6.1	Blokové schéma snímače	23
6.2	Schéma zapojení snímače	24
6.3	Výroba hardware	28
7	Vývoj Firmwaru	29
7.1	Atmel Studio 6.0	29
7.2	Komunikace pomocí protokolu FINET	29
7.3	Žhavení senzoru	31
7.4	Měření koncentrace plynů	32
7.5	Měření teploty pomocí čidla SMT160	34
7.6	Zápis dat do EEPROM	35
7.7	Popis hlavního programu	36
8	Kalibrace	38
8.1	Kalibrace oxidu uhelnatého	38
8.2	Kalibrace metanu	39
8.3	Linearizace převodních charakteristik	40
9	Testování	41
10	Závěr	45

Seznam použité literatury	I
Seznam příloh	I
Přílohy.....	II
A. Tabulka závislosti výstupu AD převodníku na koncentraci CO	II
B. Tabulka závislosti výstupu AD převodníku na koncentraci CH ₄	III
C. Kalibrační charakteristiky pro linearizaci.....	IV
D. Pohled na vrstvu TOP bez součástí.....	V
E. Pohled na vrstvu BOTTOM bez součástí	VI
F. Závislost odporu senzoru TGS3870 na koncentraci plynů.....	VII
G. Naměřená hodnota koncentrace iBridem MX6	VIII
H. Naměřená hodnota koncentrace testovaným snímačem	IX
I. Seznam součástí.....	X

1 ÚVOD

Téma diplomové práce je měření toxických plynů. Toxických plynů je široká škála a proto, pro tuto diplomovou práci byly vybrány dva plyny.

Tato diplomová práce se tudíž bude zabývat měřením oxidu uhelnatého (CO) a metanu (CH₄). Oxid uhelnatý je značně jedovatý čili toxický. Metan není jedovatý, ale zato je vysoce hořlavý a tudíž ve vysoké koncentraci velmi nebezpečný. Proto je důležité tyto plyny měřit a to především v oblastech jejich výskytu. Oxid uhelnatý vzniká nedokonalým spalováním organických látek, za malého přístupu vzduchu, tudíž je potřeba ho měřit v energetickém, automobilovém a metalurgickém průmyslu. Metan je hlavní složkou zemního plynu, a tudíž se vyskytuje buď samostatně nebo spolu s ropou nebo černým uhlím a je potřeba jej měřit, pro bezpečnost lidí zde pracujících. Společným místem výskytu těchto plynů je obecně řečeno průmyslová oblast velkých měst.

Druhá kapitola se zabývá podrobnějším popisem měřených plynů a jejich vlastností. Také je zde podrobně popsán použitý senzor Figaro TGS 3870, který dokáže změřit koncentraci oxidu uhelnatého a metanu v ovzduší. Je zde k dispozici konstrukce senzoru, závislost odporu senzoru na měřeném plynu a jeho řízení.

Jelikož výstupem senzoru TGS3870 je analogová hodnota napětí, musí být tato hodnota digitalizována a k tomu slouží integrovaný A/D převodník v mikrokontroléru ATmega644P. Ve třetí kapitole je proto popsán obecně princip A/D převodníků a podrobný popis funkčnosti použitého A/D převodníku. Také je zde popsán Demultiplexor, který připojuje v daný čas zátěž k senzoru TGS 3870 pro získání správné hodnoty měřeného napětí. Dále je zde popsána pulzní šířková modulace, která slouží pro živení senzoru TGS 3870.

Čtvrtá kapitola popisuje veškeré použité komunikační prvky jako je UART, který slouží pro komunikaci s převodníkem na sběrnici RS-485, která je zde také pospána. Navrhovaný snímač musí komunikovat s nadřazenou stanicí M4016 pomocí protokolu FINET, a tudíž je zde podrobně popsán i tento protokol. Nadřazená stanice se nastavuje do spousty různých režimů přes osobní počítač pomocí programu MOST, proto je zde popsán i tento program.

V páté kapitole jsou popsány všechny použité vlastnosti, funkce a periferie zvoleného mikrokontroléru ATmega644P.

V šesté kapitole je dopodrobna popsán navržený hardware. V sedmé kapitole je popsána celková i podrobná funkčnost vyvinutého softwaru, zobrazeny a pospány části zdrojového kódu, vývojové diagramy a vytvořené funkce. Osmá kapitola se zabývá kalibrací navrženého a funkčního snímače. V deváté kapitole jsou zobrazeny dosažené výsledky měření a chyby měření.

V závěru práce jsou zhodnoceny výsledky měření, definovány třídy přesnosti, nedostatky objevené po testování a návrhy na vylepšení snímače pro přesnější měření.

2 Měření plynů

2.1 Základní vlastnosti CO a Metanu

Metan (CH_4) je nejjednodušší alkan a tedy i nejjednodušší uhlovodík. Při pokojové teplotě je to netoxický plyn bez barvy a zápachu, lehčí než vzduch. Hlavním zdrojem metanu je zemní plyn. Metan je výbušný plyn, ale meze výbušnosti jsou značně velké, od 4,4 do 15 objemových procent (44000 ppm do 150000 ppm).

Hlavní oblastí použití metanu je energetika, kde ve směsi s jinými uhlovodíky slouží jako plynné palivo. Kapalný metan byl používán ve směsi s kapalným kyslíkem jako pohonná látka v raketových motorech. V chemickém průmyslu se používá k výrobě oxidu uhličitého. Při neúplném spalování se používá k výrobě sazí, používaných jako plnidlo a barvivo v gumárenském průmyslu. Pyrolýzou (tepelným rozkladem) za nepřístupu vzduchu se vyrábí acetylen a vodík. [1]

Oxid uhelnatý (CO) je bezbarvý plyn bez chuti a bez zápachu. Je lehčí než vzduch a vzniká nedokonalým spalováním paliv všech druhů. Chemicky je CO pasivní plyn. Na vzduchu se vzněcuje cca při 700 °C a shoří na oxid uhličitý (CO_2). Oxid uhelnatý je anhydridem kyseliny mravenčí, s vodou však nereaguje a rozpouští se v ní jen v omezené míře. V atmosféře setrvává 36 až 110 dnů.

Prudce se slučuje s kyslíkem za uvolnění značného množství tepla (hoří namodralým plamenem). Ve směsi se vzduchem, obsahující od 12,5 do 74,2 % CO, vybuchuje.

CO je velmi jedovatý. To je způsobeno tím, že znemožňuje přenos kyslíku v krvi. Jeho vazba na hemoglobin je 200krát silnější než vazba kyslíku na hemoglobin a proto jeho odstranění z krve trvá mnoho hodin až několik dní. Toto je i podstatou jednoho ze škodlivých vlivů kouření, protože CO vzniká i při kouření. [2]

Koncentraci plynu v ovzduší lze vyjádřit jako počet částic na milion (ppm) nebo na miliardu (ppb). To si lze lépe představit jako 1 cm³ plynu na 1 m³ vzduchu.

2.2 Figaro TGS 3870

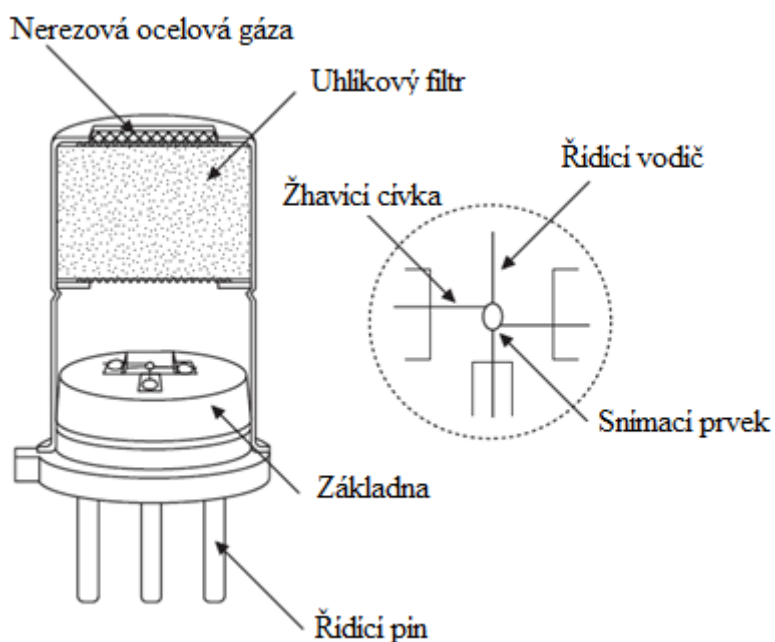
TGS 3870 je plynový senzor na bázi oxidů kovů pro detekci metanu (CH_4) a oxidu uhelnatého (CO). TGS 3870 může být použit pro měření obou plynů s periodickým použitím dvou různých žhavicích napětí v rozmezí jednoho měřicího cyklu (20 s). Průměrná spotřeba senzoru je 38 mW. Má nízkou citlivost na alkoholové výpary, velkou životnost, nízkou cenu, miniaturní velikost a umožňuje měřit metan až do koncentrace 12500 ppm, což je 1,25 % objemové hmotnosti.

Princip senzoru:

Plynové senzory série TGS používají obohacené oxidy kovů ve spojení s ušlechtilými kovy, které po zahřátí na určitou teplotu reagují na plyn velkým poklesem jejich odporu. Vzhledem k tomu, že snímací materiál není spotřebováván, mají tyto senzory velmi velkou životnost.

Struktura senzoru:

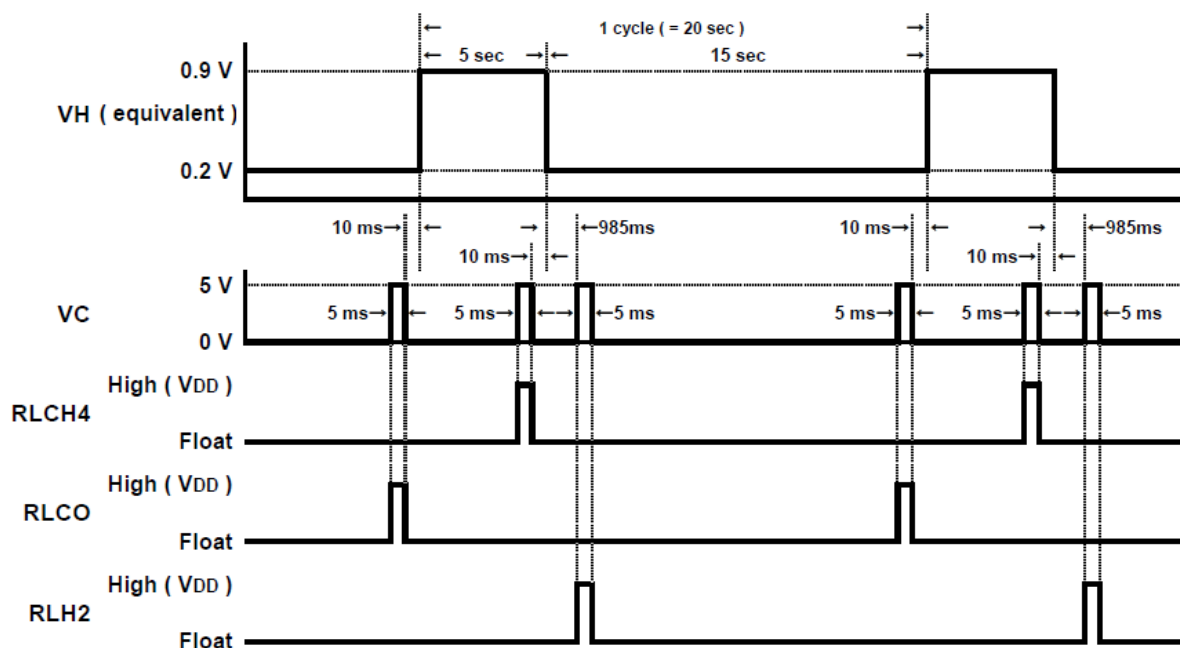
Žhavicí cívka a elektroda jsou upevněny v malé kuličce z SnO_2 . Kulička se vyrábí tak, aby její povrch byl co největší (porézní), můžeme tedy říci, že co kus to originál. Obě žhavicí cívky jsou vyrobeny z Pt drátu a jsou bodově navařeny na piny senzoru, které jsou vyrobeny ze slitiny Ni-Fe (42%Fe). Základ senzoru je vyroben z PBT (polybutylenu tereftalátu) a víčko senzoru je vyrobeno z poniklované oceli. Horní otvor je pokryt dvojitou vrstvou mřížky z nerezové oceli. Pod víčkem senzoru je uhlíkový filtr pro snížení rušení jinými plyny [4]. Struktura senzoru je na Obr. 2.2.1.



Obr. 2.2.1 Struktura senzoru TGS 3870

Princip měření:

Senzor má 3 piny. Pin číslo 1 je společná zem (GND), pin číslo 2 je snímač (+) a pin číslo 3 je žhavicí cívka (+). Na Obr. 2.2.2 je časová tabulka pro senzor TGS 3870. Senzor měří plyny při určitých teplotách žhavicí cívky, které jsou optimální pro snímání dvou různých plynů. Těmto teplotám odpovídají hodnoty napětí 0,9 V po dobu 5 sekund (metan) a 0,2 V po dobu 15 sekund (CO). Výsledné hodnoty plynů se vždy získají 15 až 10 ms před ukončením žhavicího cyklu pro určitý plyn.



Obr. 2.2.2 Časová tabulka senzoru TGS3870 [5]

Pro měření metanu musí být k senzoru připojen do série odpor R_L o hodnotě $1\text{ k}\Omega$ a pro měření oxidu uhelnatého musí být připojen odpor R_L do série o hodnotě $3,3\text{ k}\Omega$. K senzoru může být připojen v jednu chvíli pouze jeden odpor, jinak by byl ovlivněn výsledek měření. Výsledný měřený odpor senzoru se poté vypočítá podle vztahu (1):

$$R_S = \frac{V_{RS} - 0,5V_H}{V_C - V_{RS}} * R_L \quad (1)$$

,kde:

V_{RS} – Měřicí napětí

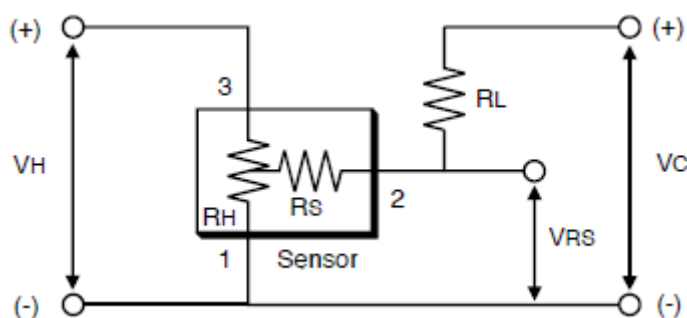
V_C – Obvodové napětí

V_H – Žhavicí napětí

R_L – Zatěžovací odpor

R_S – Odpor senzoru

Na Obr. 2.2.3 je zobrazen základní měřicí obvod pro lepší představu logického uspořádání senzoru a lepšímu pochopení jeho funkce.



Obr. 2.2.3 Základní měřicí obvod senzoru TGS3870 [5]

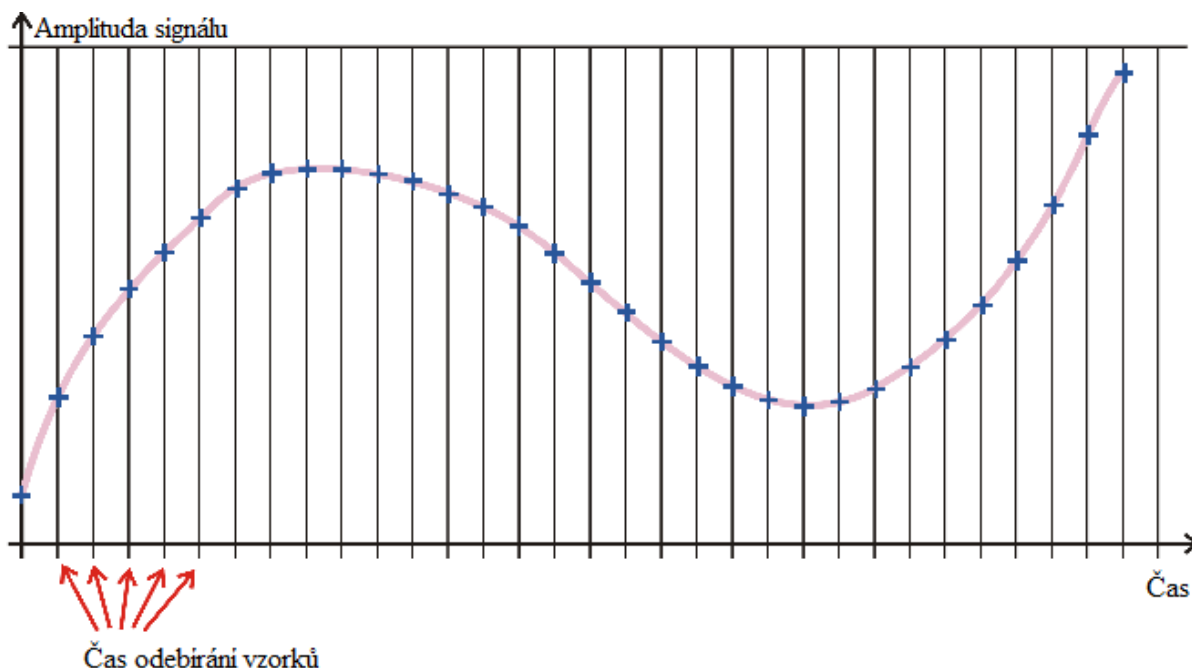
3 Zpracování signálů

3.1 A/D převodník

Analogově digitální převodník je elektronická součástka určená k převodu spojitého (analogového) signálu na signál diskrétní (digitální). Důvodem použití A/D převodníku je možnost zpracování původně analogového signálu různými druhy procesorů (DSP, MCU atd...). Dalším důvodem převodu je, že digitální signál lze přenášet s menším zkreslením a menšími nároky na přenosové cesty. V digitální podobě se dají signály daleko kvalitněji zaznamenávat. [3]

Princip převodu:

Převod spojitého signálu na diskrétní se skládá ze vzorkování signálu, kvantování a kódování signálu. Vzorkování se provádí tak, že se rozdělí vodorovná osa signálu (čas) na rovnoměrné úseky a z každého úseku se odebere jeden vzorek (na Obr. 3.1.1 jsou tyto vzorky znázorněny modrými křížky). Z původního signálu se ztratí mnoho detailů, protože namísto spojitě čáry se získá pouze množina diskrétních bodů s intervalem odpovídající použité vzorkovací frekvenci.

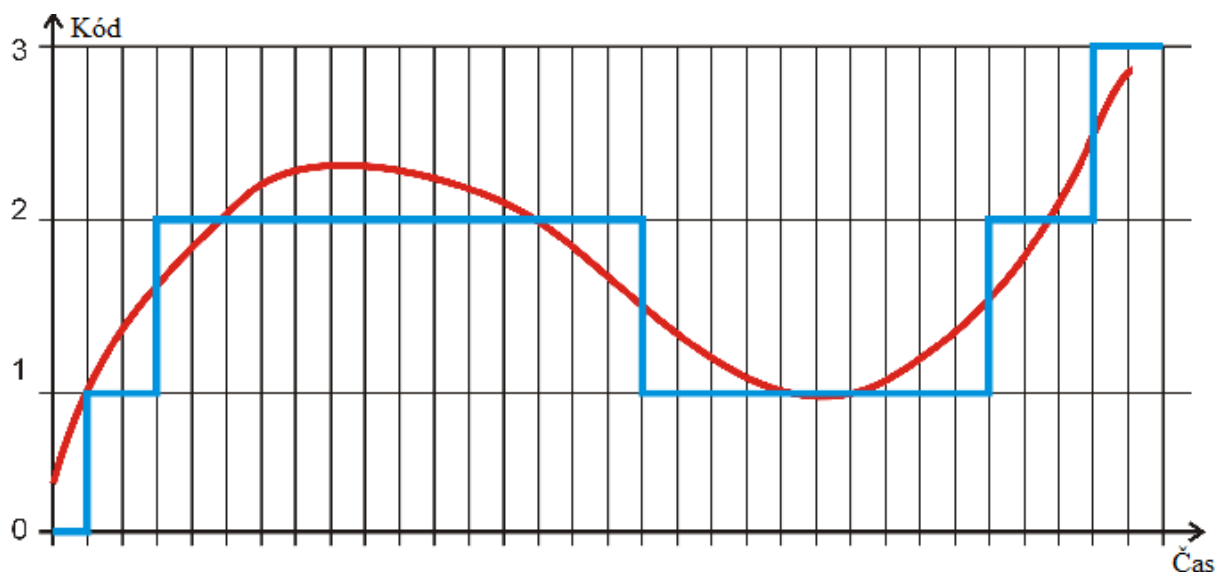


Obr. 3.1.1 Vzorkování signálu [15]

Pokud se v původním spojitém signálu vyskytují frekvence vyšší, než je polovina vzorkovací frekvence dojde k úplnému a nezvratnému zkreslení signálu. Tento jev se nazývá aliasing. Aliasingu se dá zabránit takzvaným antialiasing filtrem, což je dolnoproustný filtr zařazený před převodníkem. Ten nedovolí frekvencím vyšším než je vzorkovací frekvence vstoupit do převodníku.

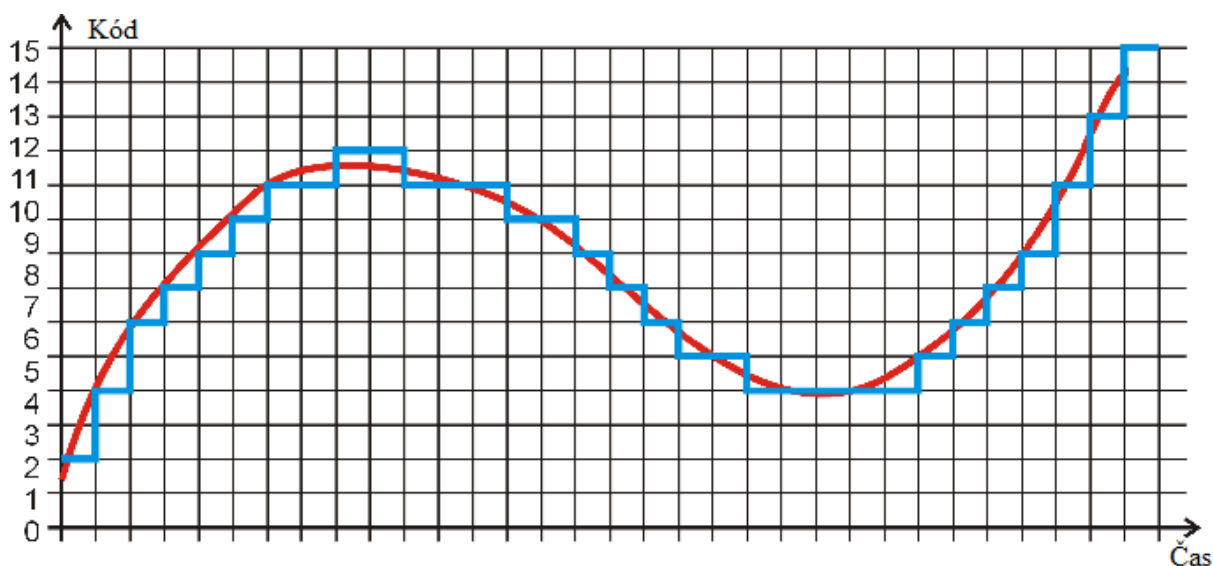
Kvantování se provádí tak, že se svislá osa signálu rozdělí na určitý počet hodnot. Například na Obr. 3.1.2 je signál kvantován s rozlišením 2 bity. Aby bylo možné určit, jakou hodnotu má mít určitý vzorek, rozdělí se prostor kolem jednotlivých hodnot na toleranční pásy. Jakémukoliv vzorku, který padne do určitého tolerančního pásu je přiřazena určitá hodnota. Kvantovaný signál je na Obr. 3.1.2 a Obr. 3.1.3 zobrazen modře a původní signál červeně.

Kvantované hodnoty se ve většině případů liší od skutečných navzorkovaných hodnot. Velikost kvantizační chyby je vzdálenost mezi kvantovanými a původními navzorkovanými body. Velikost této chyby se pohybuje v intervalu $\pm 1/2$ kvantizační úrovně.



Obr. 3.1.2 Kvantovaný signál s rozlišením 2 bity [15]

Na Obr. 3.1.3 je zobrazen signál kvantovaný s rozlišením 4 bity:



Obr. 3.1.3 Kvantovaný signál s rozlišením 4 bity [15]

Poslední fází A/D převodu je kódování. To jsou kvantované hodnoty vyjádřené čísly v určitém kódu.

Základní pojmy:

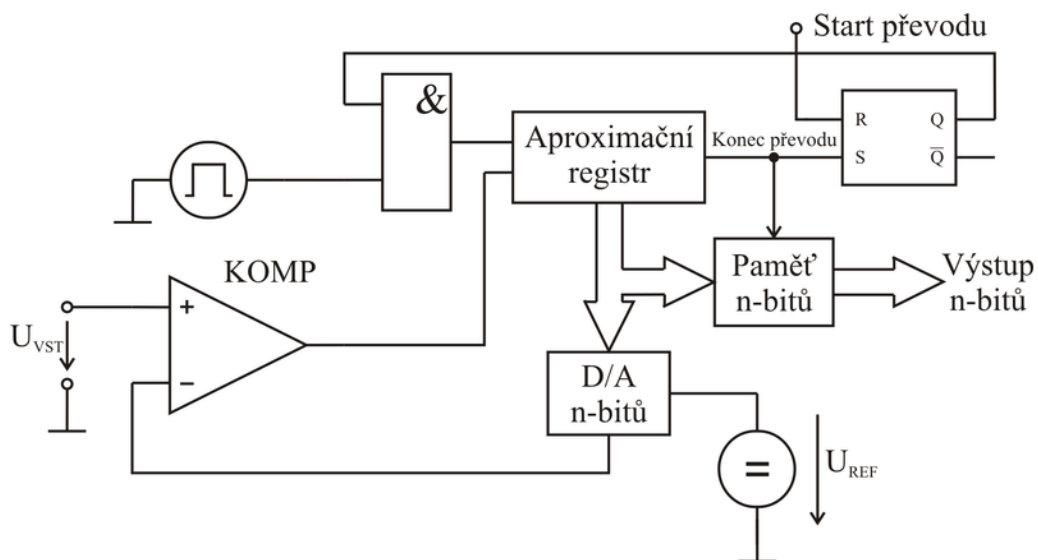
- kvantovací krok q – vzdálenost dvou kvantovacích hladin
- bit LSB (Least Significant Bit) – bit ve výstupním číselném kódu, který má nejmenší váhu
- bit MSB (Most Significant Bit) – bit ve výstupním číselném kódu, který má největší váhu
- kvantizační šum – rozdíl kvantovaného a vstupního spojitého signálu, může nabývat hodnot $\pm q/2$
- chyba zesílení – je dána odchylkou sklonu skutečné převodní charakteristiky A/D převodníku od ideální
- chyba nuly – je dána posunem převodní charakteristiky ve směru osy N
- chyba linearity převodu

Počet kvantizačních úrovní A/D převodníku je roven N -té mocnině čísla 2, přičemž nakvantovaný signál pak lze vyjádřit v N bitech.

Druhy A/D převodníků:

- Komparační
 - Paralelní A/D převodník
 - S postupnou komparací
- Kompenzační – jsou to automatické kompenzátory napětí. Porovnávají vstupní napětí s hodnotou zpětnovazebního napětí, získaného pomocí D/A převodníku z výstupního číslicového slova. Tento výstup se mění tak dlouho, dokud není rozdíl obou napětí minimální a potom se převod ukončí. Jsou nejpoužívanější, protože jsou konstrukčně jednoduché a relativně rychlé. Podle toho jakým způsobem se řídí změna výstupního slova, se dělí na:
 - Čítací
 - Sledovací
 - S postupnou aproximací
- Integrační
- S dvojitou integrací
- Sigma-delta převodníky

ATmega 644P využívá A/D převodník kompenzační s postupnou aproximací. Při použití postupné aproximace se zkusmo nastaví jednotlivé váhové bity. Začíná se bitem MSB a končí bitem LSB. Na začátku cyklu převodu se nastaví hodnota převodu výstupu aproximačního registru na 10000000, čemuž odpovídá výstup zpětnovazebního D/A převodníku $U_{REF}/2$. Toto napětí se porovná v komparátoru se vstupním napětím. Je-li vstupní napětí větší než U_{REF} , ponechá se MSB nastaven na 1, v opačném případě se nastaví na 0. V dalším kroku se zkusmo nastaví na 1 další váhový bit. Na výstupu tedy bude 11000000 nebo 01000000, podle výsledku předchozího kroku. Opět se porovná zpětnovazební a vstupní napětí a aktuální bit se nastaví na 1 nebo 0. Takto se postupuje až k LSB. Změna vstupního napětí během převodu způsobí chybu, a proto musí být vstup opatřen vzorkovacím obvodem. [3]



Obr. 3.1.4 Bokové schéma aproximačního AD převodníku [3]

3.2 Demultiplexor

Digitální demultiplexor (anglicky demultiplexer, zkráceně DEMUX případně DMUX) je kombinační logický obvod. Demultiplexor přepíná jeden vstupní signál na několik výstupů, přičemž příslušný výstup se vybírá adresovým signálem. Demultiplexor se nejčastěji používá ve spojení s multiplexorem pro deserializaci signálu přenášeného s využitím jednoho datového vodiče. Dále se používá pro řízení číslicového, alfanumerického nebo maticového displeje. Pro tuto práci je demultiplexor využit jako přepínač zatěžovacího odporu pro měření více různých plynů, protože každý plyn potřebuje jiný zatěžovací odpor.

Pro tuto práci je zvolen typ 74HC4052. Na základě vstupních kombinací řídicích bitů jsou zapínány jednotlivé výstupy. Který výstup se zapne, při dané kombinaci závisí na logické úrovni vstupních pinů zobrazených v Tabulka 1.

Tabulka 1: Závislost výstupu na vstupu

Vstup			Zapnutý kanál
E	S ₁	S ₀	
1	0	0	nY ₀ a nZ
1	0	1	nY ₁ a nZ
1	1	0	nY ₂ a nZ
1	1	1	nY ₃ a nZ
0	x	x	Nic

3.3 PWM

Pulzně šířková modulace neboli PWM (Pulse Width Modulation) je diskrétní modulace pro přenos analogového signálu pomocí dvouhodnotového signálu. Jako dvouhodnotová veličina se ve velké většině používá napětí. Signál je přenášen pomocí střídavy (Duty cycle). Střída je poměr doby sepnutí k celkové periodě (2).

$$D = \frac{T_{on}}{T_p} \quad (2)$$

,kde:

D – střída

T_{on} – doba sepnutí

T_p – perioda

Vzhledem ke svým vlastnostem se PWM využívá především ve výkonové elektronice pro řízení velikosti napětí nebo proudu (spínání/rozpínání tranzistoru). Například když se vytvoří střída $D=0,5$, bude tranzistor sepnutý polovinu času. Ztráty na tranzistoru budou nejvyšší při spínání a rozpínání tranzistoru (čím vyšší frekvence spínání tím vyšší ztráty). Při sepnutém tranzistoru jím poteče proud, ale tranzistor bude v saturaci, takže se na něm vytvoří pouze malý úbytek napětí a výkonové ztráty budou minimální. Při rozepnutém stavu na něm bude plné napětí, ale bázi poteče minimální proud, a tudíž ztráty budou minimální. Pomocí PWM se může dosáhnout velké účinnosti (obvykle nad 90 %). Při řízení teploty, otáček, jasu atd... se využívá tepelné setrvačnosti, rychlostní setrvačnosti, nedokonalosti lidského zraku atd... Využívá se jevů, které nejsou pro zařízení nebo člověka postřehnutelné. [10]

Princip PWM v mikroprocesorech je pouhé vybrání režimu čítače. Na Obr. 3.3.1 je zobrazen režim Fast PWM a Phase Correct PWM. Rychlé PWM funguje tak, že čítač zvyšuje obsah registru TCNTn od hodnoty BOTTOM do hodnoty TOP. V neinvertujícím režimu se výstup OCn nastaví při shodě obsahu registru TCNTn a registru OCRn a vynuluje se při dosažení hodnoty TOP (v tomto případě 255). Při invertujícím režimu by to bylo naopak. Rozlišení rychlého PWM může být pevné 8,9,10 a nebo 16 bitů. Případně může být proměnné definované obsahem registru ICRn nebo OCRnA. [11] Vypočítá se podle vztahu (3).

$$R_{FPWM} = \frac{\log(TOP + 1)}{\log(2)} \quad (3)$$

Frekvence PWM se určí na základě následujícího vztahu (4):

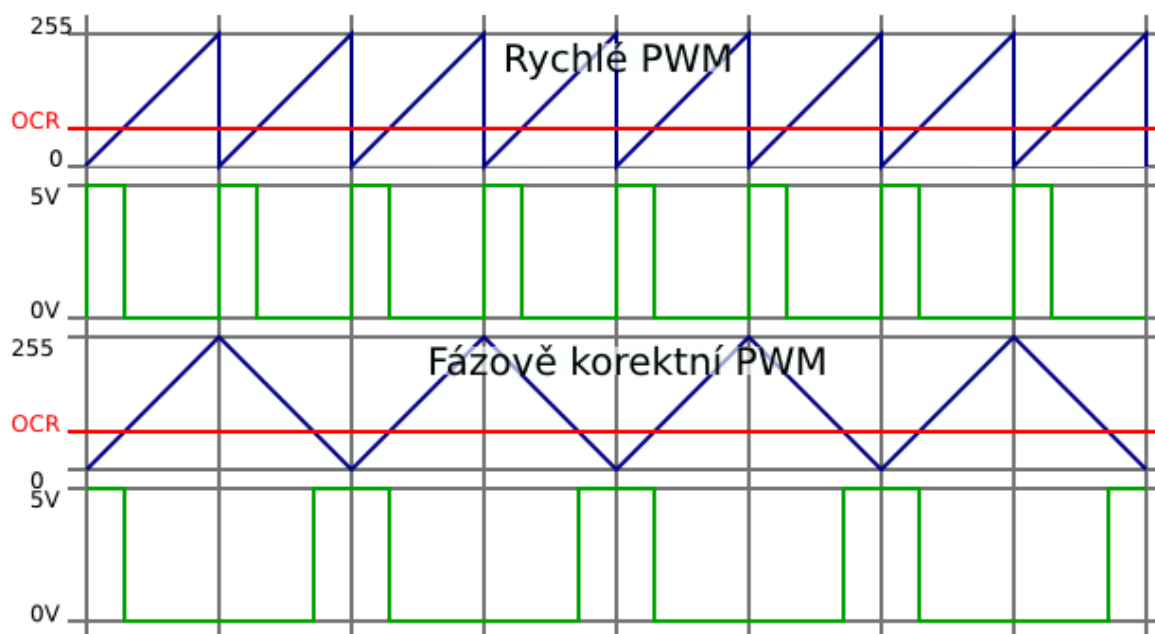
$$f_{OCnPWM} = \frac{f_{clkIO}}{N(1 + TOP)} \quad (4)$$

,kde:

f_{clkIO} – frekvence hodin

N – předdělička (prescaler)

TOP – maximální hodnota čítače



Obr. 3.3.1 Grafické znázornění funkčnosti PWM [9]

Na Obr. 3.3.1 modrá křivka znázorňuje průběh plnění registru TCNTn, zelená křivka znázorňuje průběh výstupu OCn a červená křivka znázorňuje průběh porovnávacího registru OCRn.

Fázově korektní PWM funguje podobně jako Rychlé PWM s tím rozdílem, že po dosažení hodnoty TOP se místo vynulování začne dekrementovat a po dosažení hodnoty BOTTOM se začne znovu inkrementovat viz. Obr. 3.3.1.

4 Komunikace

4.1 UART

Historie:

První UART jako zařízení (s pevnou délkou impulsů) byly rotující mechanické spínače. Kolem roku 1971 začala firma Western Digital vyrábět první jednočipový UART WD1402A, což byl jeden z prvních příkladů velikostně odpovídající střednímu integrovaného obvodu. Další populární čip byl SCN2651 od Signetics 2650. V roce 1990, byly vyvinuty novější UARTy s vyrovnávací pamětí na čipu. To umožnilo vyšší přenosové rychlosti bez ztráty dat a nutnosti časté kontroly od počítače. [14]

Ujasnění pojmů:

Způsoby komunikace se dělí na synchronní a asynchronní. Rozdíly mezi nimi jsou v čase, kdy komunikace probíhá. Tedy jestli komunikace probíhá v reálném čase či zda v ní účastníci na sebe reagují s určitým zpožděním.

Synchronní přenos vyžaduje, aby měli příjemce i odesílatel sdílené hodiny nebo jiný časový signál tak, aby přijímač věděl, kdy může číst. Mezi nástroje synchronní komunikace patří například chat a videokonference. Výhody synchronní komunikace jsou:

- nejvíce se blíží klasické třídě, kdy se studující může okamžitě na něco zeptat a hned obdržet odpověď;
- umožňuje rychle reagovat;

Asynchronní přenos umožňuje přenos dat, aniž by odesílatel musel poslat hodinový signál k přijímači. Místo toho se musí nastavit časové parametry předem. Speciální bity jsou dány před každé slovo. Speciální bity („Start“, „Stop“) se používají pro synchronizaci přijetí a odesílání. Mezi představitele asynchronní komunikace se řadí především fóra, virtuální výukové prostředí (Moodle). Výhody asynchronní komunikace:

- nevyžaduje zapojení účastníků ve stejném čase
- účastníci nemusí okamžitě reagovat
- je zaznamenána historie, což umožňuje jednodušší organizaci příspěvků
- bývají stanoveny „časové mantinely“ ohledně doby vložení příspěvku

USART, neboli *Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter* je obvod schopný obousměrné komunikace rychlostmi jednotek až desítek kbaud. Umožňuje jak synchronní, tak asynchronní přenos s možností nastavení 5 - 9 datových bitů, nastavení počtu stop-bitů a parity.

Použití jednotky USART

USART je možno použít pro sériový přenos v několika režimech. Z toho důvodu je nutné ji před použitím správně nastavit.

Příprava nastavení se skládá z:

- nastavení přenosového rámce (počet datových bitů, parita, počet stop-bitů)
- nastavení přenosové rychlosti

Asynchronní 8-bitový přenos

USART vysílá data na pinu označovaném obvykle jako TX (transmitter), přijímá na pinu RX (receiver). Klidová úroveň signálu je log. 1 (pokud neprobíhá vysílání ani příjem). Vysílání je zahájeno změnou hodnoty signálu na log. 0 po dobu jednoho bitu (tzv. start-bit). Následovně se posílá nejnížší datový bit, poslední nejvýznamnější datový bit je následován stop bitem, který má opět úroveň log. 1. Po odvysílání stop-bitu může začít přenos dalšího bajtu.

Synchronní mód používá hodinovou a datovou linku, ale v asynchronním není tento hodinový signál použit. Jeden pin je použit pro vysílání a jeden pro příjem. Obě operace mohou probíhat nezávisle na sobě. A mohou dokonce probíhat zároveň – proto mluvíme o asynchronním módu jako o plně duplexním. Nejčastější použití USARTu v asynchronním módu je pro komunikaci s PC prostřednictvím sériového portu a protokolu RS-232.

Vyslání bajtu

Jakmile jsou data zapsána do registru TXREG, všechny bity jsou přepsány do registru pro vysílání (Transmit Shift Register). A odtud jsou dále přeposlány na TX pin, přičemž je jim přiřazen na začátek start a na konec stop bit. Použití speciálního registru pro vysílání umožňuje načítání nových dat do registru TXREG už během vysílání dat předchozích. To maximálně zefektivňuje komunikaci.

Příjem bajtu

Po detekci start bitu na pinu RX, se další data bit po bitu přesunou do registru pro příjem (receive shift register). Po přesunutí posledního bitu se zkontroluje stop bit a data se pošlou do bufferu, který je předá registru RCREG, pokud je prázdný. Tento buffer a registr RCREG jsou dva elementy FIFO. [13]

Nejčastější chyby přijímače

Overrun error:

Je to chyba přeplnění registru a dochází k ní, když přijímač nemůže zpracovat znak, který právě do něj vstoupil před tím, než přijde další znak. Různá zařízení mají různé množství vyrovnávací paměti, čili schopnosti držet přijaté znaky. Pokud CPU není dostatečně rychlé, a vyrovnávací paměť se zaplní, bude přetečení chybné, a přichozí znaky budou ztraceny.

Underrun error:

Je to chyba prázdného buffer a dochází k ní, když vysílač UART dokončil zaslání znaku a vysílací buffer je prázdný.

Framing error:

Je to chyba rámce a dochází k ní, když nejsou nalezeny Start a Stop bity. "Start" bit se používá k identifikaci pro začátek přichozího znaku, to funguje jako reference pro zbývající bity. [14]

Základní popis nastavení komunikace

Jednotka USART je složena ze tří hlavních bloků. Z vysílače, přijímače a generátoru hodin. Generátor hodin slouží pro generování synchronizačních signálů. Vysílač a přijímač obsahují buffery pro vysílání a příjem bajtů. Je-li obvod správně nastaven, je možné odvyšlat bajt pouhým zápisem do bufferu. Po odvyšlání celého bajtu je nastaven příznak TXC v registru UCSRA. Při příjmu je nastaven bit RXC registru UCSRA. Příznaky jsou čitelné pouze jednou a po přečtení jsou automaticky nulovány.

Režimy:

Jednotka USART může pracovat celkem ve čtyřech režimech:

- asynchronní režim
- asynchronní režim s dvojnásobnou rychlostí
- synchronní master
- synchronní slave

Ke komunikaci s PC se používá jeden z prvních dvou režimů, pokud není žádný zvláštní důvod, využívá se raději režim první. K nastavení dvojnásobné přenosové rychlosti stačí nastavit bit U2X registru UCSRA. Mezi synchronním a asynchronním režimem se volí nastavením bitu UMSEL (nastaveno pro synchronní). V tomto případě se také určuje zdroj hodinového signálu a to bitem DDRB0, který je v registru DDRB. Hodinový signál je poté přiváděn (nebo odváděn) pinem XCK. Pro nastavení přenosové rychlosti slouží registry UBRRH a UBBRL. Hodnota těchto registrů pro asynchronní režim se spočítá podle vzorce (5):

$$f_{BR} = \frac{f_0}{16 * (UBRR + 1)} \quad (5)$$

4.2 RS-485

EIA-485 (původně RS-485) je standard sériové komunikace definovaný v roce 1983 sdružením EIA. Je to velmi odolná komunikační sběrnice používaná především v průmyslových zařízeních nebo v prostředích s požadavky na vysokou odolnost proti rušení. Standard RS-485 je navržen tak, aby umožňoval vytvoření dvou vodičového poloduplexního vícebodového sériového spoje. Má stejný základ jako standard RS-232, od kterého se liší především jinou definicí napěťových úrovní a nepřítomností modemových signálů. Ve standardu nejsou definovány standardní konektory, a tudíž není definované ani jejich zapojení. Maximální definovaný napěťový rozsah je od $-7V$ do $+12V$. Obvody pro RS-485 jsou vybaveny ochranou proti zkratu. Za zkratový proud je považován 150 mA proti zemi, ale pro A nebo B signály je za zkratový proud považován proud 250 mA.

RS-485 je typická dvou vodičovým propojením jednotek. Tyto vodiče se označují písmeny A a B, zřídka se používá označení „-“ a „+“. V klidovém stavu je vodič B vždy kladnější než vodič A. Maximální délka sběrnice je až 1200 m, maximální počet uzlů (tj. zařízení vysílajících a přijímajících po lince data) je 32. Při použití opakovačů může být počet uzlů vyšší. Přenosová rychlost je nepřímo úměrná délce vedení. U krátkých spojů (do 10m) může být až 10 Mb/s. Při komunikaci na delší vzdálenosti musí být vedení na obou koncích zakončeno terminátory, aby nedocházelo k odrazu signálu od konců vedení. Terminátor by měl mít hodnotu $120\ \Omega$, výsledná impedance linky je pak $60\ \Omega$ ($120\ \Omega \parallel 120\ \Omega$).

Logické úrovně (stavy) jsou reprezentovány rozdílným napětím mezi oběma vodiči. Přijímač rozlišuje logický stav „1“ (označovaný jako „Mark“) při rozdílu napětí $A - B < -200\ mV$. Logický stav „0“ (označovaný jako „Space“) nastane při rozdílu napětí $A - B > +200\ mV$. Při spojení na delší vzdálenosti je nutné propojit kromě signálových vodičů (A a B) i země (GND) komunikačních zařízení. Příčinou je, že na vzdálených místech mohou existovat značné rozdíly v potenciálu země.

Přenos dat se uskutečňuje pomocí 7 nebo 8 bitových rámců se startbitem, jedním nebo více stopbity a případně i paritním bitem. Startbit je reprezentován logickou nulou, stopbit a neaktivní stav je reprezentován logickou jedničkou.

U sběrnice RS-485 může nastat dvojí zapojení a to buď dvou vodičové (nejčastější), nebo čtyřvodičové. U dvou vodičového zapojení je přenos poloduplexní a proto vyžaduje řízení přenosu dat (směru komunikace). Aby v jednom okamžiku vysílalo pouze jedno zařízení, musí zajistit komunikační protokol, který není součástí standardu EIA-485. Nejjednodušší variantou je konfigurace s jedním trvale připojeným vysílačem a maximálně 31 přijímači. Čtyřvodičová verze poskytuje plněduplexní (obousměrnou) komunikaci a odpadá tak nutnost řízení směru přenosu dat. Pro fyzické zapojení se využívá kroucená dvojlinka. [12]

4.3 Protokol FINET

Protokol FINET je binární protokol s pevným rámcem (úvodní ukončovací znak) určený pro přenos po duplexních i poloduplexních komunikačních kanálech.

Protokol je vysvětlen na příkladu měřicího přístroje (dále MP). MP se vždy chová jako SLAVE zařízení. Komunikaci vždy navazuje nadřazený systém na principu dotaz odpověď. MP odpovídá na každý dotaz pro něj určený, pokud ne, jedná se o závažnou chybu v komunikaci.

Důležitým parametrem je doba označená jako klid na lince. Ta je podmínkou pro rozeznání začátku bloku dat. Obvykle je nastavena na trojnásobek doby potřebné k odeslání jednoho bytu. Tato prodleva je nutná jak na straně SLAVE mezi přijetím dotazu a odesláním odpovědi, tak i na straně MASTER po přijetí odpovědi před vysláním dalšího dotazu.

Druhým časovým parametrem je maximální doba mezi jednotlivými byty zprávy. Po jejím vypršení je zbytek zprávy ignorován a čeká na příchod nové zprávy (SLAVE) nebo vyše opakovaný dotaz (MASTER).

Obvyklé nastavení komunikačního portu je 19200 b, 8 bitů, žádná parita, 1 stop bit a žádné řízení toku dat. [6]

Komunikační rámec

Směr MASTER -> SLAVE - Zpráva (dotaz) bez datového pole

SD1	DA	SA	FC	FCS	ED
-----	----	----	----	-----	----

Směr MASTER -> SLAVE - Zpráva (dotaz) s datovým polem

SD2	LE	LER	SD2R	DA	SA	FC	DATA..	FCS	ED
-----	----	-----	------	----	----	----	--------	-----	----

Směr SLAVE -> MASTER - Odpověď bez datového pole - krátké potvrzení

SACK

Směr SLAVE -> MASTER - Odpověď bez datového pole

SD1	DA	SA	FC	FCS	ED
-----	----	----	----	-----	----

Směr SLAVE -> MASTER - Odpověď s datovým polem

SD2	LE	LER	SD2R	DA	SA	FC	DATA..	FCS	ED
-----	----	-----	------	----	----	----	--------	-----	----

Směr SLAVE -> MASTER - Negativní odpověď

SD2	LE	LER	SD2R	DA	SA	FC	ER1	ER2	FCS	ED
-----	----	-----	------	----	----	----	-----	-----	-----	----

SD1 – úvodní znak 1, pevná hodnota \$10

SD2 – úvodní znak 2, pevná hodnota \$68

LE – délka dat, vlastní délka dat + 3 (DA,SA,FC)

LER – opakovaná délka dat

SD2R – opakovaný úvodní znak 2, pevná hodnota \$68

DA – cílová adresa zprávy

SA – zdrojová adresa zprávy

FC – řídicí byte rámce – definuje službu rámce protokolu FINET

\$00 – odpověď CONNECT

\$08 – odpověď s daty

\$0C – negativní odpověď

\$69 – dotaz CONNECT

\$63 – dotaz zápis dat do jednotky

\$6C – dotaz čtení dat z jednotky

ER1 – kód negativní odpovědi

\$F1 – neznámý kód FC

ER2 – rozšiřující data negativní odpovědi

DATA – vlastní předávaná data

FCS – kontrolní součet jako bytový součet DA+SA+FC+DATA [] modulo 256

ED – koncový znak, pevná hodnota \$16

SACK – krátké potvrzení, pevná hodnota \$E5

Adresace:

Zdrojová adresa je adresa odesílatele dat, cílová pak jeho příjemce, to platí i v odpovědi. Zdrojová adresa bývá 255(\$FF). Měřicí přístroje FIEDLER nepodporují kontrolu kolize na lince. Komunikace může, ale nemusí začínat krátkým rámcem s FC=\$69 (CONNECT) a DA=0. Odpověď pak obsahuje skutečnou adresu SLAVE přístroje.

Služba CONNECT:

Slouží pro iniciaci spojení se zařízením FINET. Dotaz tvoří rámec bez datového pole s FC=\$69 a pozitivní odpověď tvoří rámec bez datového pole s FC=\$00. Pokud je v dotazu použita DA=0, je v odpovědi skutečná adresa zařízení, které odpovědělo.

Dotaz :

\$10	DA	SA	\$69	FCS	\$16
------	----	----	------	-----	------

Kladná odpověď :

\$10	DA	SA	\$00	FCS	\$16
------	----	----	------	-----	------

Protokol FINET podporuje několik služeb, z nichž zásadní je služba IDENTITY. Slouží pro identifikaci, s jakým přístrojem se komunikuje a musí ji podporovat všechna zařízení FINET.

Při dotazování na službu IDENTITY se používá komunikační rámec MASTER->SLAVE s datovým polem:

FC=\$6C

LE=4

Datové pole tvoří pouze kód služby \$C0.

Odpověď:

FC=8

LE=64+3=67

Popis datového pole odpovědi (64B):

- | | | |
|--------|-------------|-----------------------------------|
| • byte | KKod1 | kontrolní kód 0x55 |
| • char | SWDat[9] | string datum překladu SW |
| • word | TypCislo | typové číslo |
| • char | TypHW[16] | název přístroje |
| • char | VerHW[5] | string verze HW |
| • char | VerSW[5] | string verze SW |
| • byte | DatInst | datum instalace – den |
| • byte | MesInst | datum instalace – měsíc |
| • word | RokInst | datum instalace – rok |
| • word | VyrCislo | výrobní číslo |
| • word | SWKonfig | konfigurace programových bloků |
| • byte | RTC_Trimm | kalibrační konstanta RTC |
| • byte | RTC_TepCor | teplotní korekce RTC |
| • byte | TimeType | formát času |
| • byte | MemType | typ datové paměti |
| • byte | ParType | typ parametru |
| • byte | ParSize | velikost parametru |
| • byte | ParVerz | verze parametru |
| • byte | CalType | typ kalibrace |
| • byte | PomParam[5] | pomocné parametry |
| • byte | VerzeBL | verze zavaděče FW |
| • byte | Swaping | 0 – Big Endian, 1 – Little Endian |
| • byte | FINETType | modifikace protokolu FINET |
| • byte | KKod2 | kontrolní kód 0xAA |
| • byte | Suma | kontrolní suma modulo 256 |

Datové pole tvoří parametry dotazovaného zařízení. [6]

Další důležitou službou je služba RDKAN. Slouží pro vyčítání aktuálních měřených hodnot jednoho kanálu. Při dotazování na službu RDKAN se používá komunikační rámec MASTER- SLAVE s datovým polem:

FC = \$6C

LE = 8

Datové pole tvoří pouze kód služby a tyto další parametry:

- byte Kanál – číslo měřicího kanálu (1...16)
- byte Co – kód měřené veličiny
- byte Jak – upřesnění požadavku (není potřeba uvádět)
- byte Rezerva – nemá význam

Odpověď:

FC = 8

LE = 8+3 = 11

Popis datového pole odpovědi:

- byte Co – kód měřené veličiny
- byte Chyba
- byte Formát
- byte Rezerva – nemá význam
- float Výsledek – naměřená hodnota ve formátu IEEE-754

Seznam ostatních služeb podporovaných protokolem FINET je v Tabulka 2:

Tabulka 2: Seznam podporovaných služeb protokolem FINET [7]

Služba	Kód KS	Kód FC	Popis
READN	\$0B	\$6C	Čtení obecného bloku dat
WANDRN	\$0C	\$63	Zápis a čtení obecného bloku dat
IDENTY	\$C0	\$6C	Identifikace jednotky – společná všem přístrojům
SETDPTR	\$90	\$63	Nastavení ukazovátka paměti
RDDTA1	\$AA	\$6C	Čtení datové řádky a informací o datové paměti
RDVAL	\$96	\$6C	Čtení hodnot všech kanálů + informace o chybách
RDKAN	\$E0	\$6C	Čtení aktuální hodnoty jednoho kanálu

4.4 Software MOST

MOST (Monitorovací Stanice) je uživatelsky snadno ovladatelný program pro parametrizaci stanic M4016, STELA a HYDRO-OGGER H1. Program také slouží pro zobrazení aktuálních měřených hodnot i stavů binárních vstupů/výstupů a pro základní vyhodnocení naměřených dat. Načtení dat do programu je možné uskutečnit buď kabelem z připojené stanice, exportem datového souboru ze serveru nebo vytáčeným datovým voláním.

Vedle grafického a tabulkového zobrazení dat program nabízí průměrování naměřených hodnot, výběr dat za libovolný časový úsek, vyhledávání mezních hodnot, výpočet bilancí a tisk dat ve formě zprávy, včetně automatického měsíčního členění.

Na Obr. 4.4.1 je popsáno nastavení analogových kanálů na komunikační stanici M4016. Podrobnější popsání a veškeré možnosti komunikační stanice M4016 a softwaru MOST jsou dostupné ze zdroje [16].

1. krok nastavení: vyberte libovolný volný kanál.

2. krok: vyberte měřenou veličinu

3. krok: vyberte měřicí metodu

Po stisknutí pravého tlačítka myši nad vybraným kanálem můžete jeho parametry kopírovat, vkládat nebo mazat

Jmenovka kanálu bude zobrazována na displeji jednotky a v SMS (diakritika se před odesláním SMS automaticky potlačí)

Vstup na přípojně desce nemusí odpovídat číslu kanálu

Další důležité parametry závislé na měřené veličině a na měřicí metodě

Nadlimitní interval pomůže podrobně zaznamenat zajímavé průběhy

Hystereze zabrání častému zapínání a vypínání alarmu

Strmostní alarm se aktivuje při nárůstu i při poklesu vyšší než zadanou rychlostí

Limitní alarm nastane po překročení měřené hodnoty nad horní mez nebo při poklesu pod dolní mez.

Aktivace alarmů může vyvolat odeslání SMS nebo změnit základní interval archivace na nadlimitní interval

Obr. 4.4.1 Nastavení analogových kanálů programem MOST [16]

5 ATmega 644P

5.1 Popis ATmega 644P

Je to 8-bitový mikrokontrolér ATMEL s 64 kB programovatelnou Flash pamětí. Jádro mikrokontroléru kombinuje bohatou instrukční sadu s 32 základními pracovními registry, které jsou přímo spojeny s aritmeticko logickou jednotkou (ALU). ALU umožňuje přístup ke dvěma registrům během jednoho hodinového cyklu. Výsledná architektura je až desetkrát rychlejší než běžné CISC mikrokontroléry. Jádro mikrokontroléru využívá Harvardskou architekturu se samostatnými paměťmi a sběrnicemi pro program a data. Instrukce v paměti programu jsou prováděny pomocí zřetězení v jedné úrovni, což znamená, že zatímco je jedna instrukce zpracovávána, další instrukce je načtena v paměti programu. Tento koncept umožňuje, aby byly instrukce prováděny v každém hodinovém cyklu. Paměť programu je typu Flash, která je rozdělená na dvě části (načtení programu a aplikování programu). Flash paměť má výdrž nejméně 10000 zápisů/vymazání.

Vlastnosti:

- Vysoký výkon, nízká spotřeba
- Pokročilá RISC architektura
 - 32*8 univerzálních pracovních registrů
 - Plně statické operace
 - Propustnost až 20 MIPS na 20 MHz
 - 64 kB programovatelné Flash paměti (10000 cyklů zápis/vymazání)
 - 2 kB EEPROM (100000 cyklů zápis/vymazání)
 - 4 kB Interní SRAM
- JTAG (IEEE1149.1)
 - Boundary Scan
- Periferie
 - Dva 8-bitové časovače/čítače
 - Jeden 16-bitový časovač/čítač
 - Real Time Counter s odděleným oscilátorem
 - 6 PWM kanálů
 - osmi-kanálový, 10-bitový A/D převodník
 - Dvě programovatelné jednotky USART
 - SPI
 - Programovatelný Watchdog Timer
 - Analogový komparátor
- Speciální funkce
 - Interní kalibrovatelný RC oscilátor
 - Vnější a vnitřní přerušení zdroje
 - 6 režimů spánku
- 32 programovatelných vstupně výstupních pinů
- Provozní napětí 2,7 V – 5,5 V

5.2 Popis použitých periférií

8-bitový Časovač/Čítač0 s PWM

- Dvě nezávislé výstupní porovnávací jednotky (Output Compare Units)
- Fázově korektní PWM
- Variabilní perioda PWM
- Tři nezávislé zdroje přerušení (TOV0, OCF0A, OCF0B)

8-bitový Časovač/Čítač2 s PWM

- Jednokanálový čítač
- Fázově korektní PWM
- 10-bitová předdělička
- Tři nezávislé zdroje přerušení (TOV2, OCF2A, OCF2B)

16-bitový Časovač/Čítač1 v PWM

- 16-bitové PWM
- Dvě nezávislé výstupní porovnávací jednotky (Output Compare Units)
- Jedna vstupní záchytná jednotka (Input Capture Unit)
- Fázově korektní PWM
- Externí počítadlo událostí (External Event Counter)
- Čtyři nezávislé zdroje přerušení (TOV1, OCF1A, OCF1B, ICF1)

USART

Univerzální synchronní a asynchronní přijímač a vysílač je vysoce flexibilní sériové komunikační zařízení. ATmega 644P obsahuje dvě USART jednotky (USART0 a USART1). Podporuje 4 základní režimy: normální asynchronní režim, dvojnásobná rychlost asynchronního režimu, synchronní master a synchronní slave režim. USART musí být před jakoukoliv komunikací inicializován (nastavení přenosové rychlosti, nastavení formátu rámce a povolit vysílač nebo přijímač).

- Plně duplexní provoz
- Asynchronní nebo synchronní provoz
- Vysoká přenosová rychlost
- Podporuje sériové rámce s 5,6,7,8 nebo 9 datovými bity a jedním nebo dvěma stop bity
- Generování liché nebo sudé parity
- Detekce přetečení dat
- Detekce chyby rámce
- Tři samostatné přerušení na kompletní TX a RX a prázdný TX datový registr
- Dvojnásobná rychlost při asynchronním režimu

A/D převodník

Je to 10-bitový A/D převodník s postupnou aproximací a je připojen k osmi kanálovému analogovému multiplexoru, připojeného na piny portu A. A/D převodník obsahuje vzorkovací obvod, který zajistí, že vstupní napětí na A/D převodníku je podrženo na konstantní úrovni během převodu. Má taky samostatný analogový napájecí pin (AVCC). Správně převedená hodnota měřeného signálu nastává až po druhém převodu, proto musí být první dva převody zahozeny.[8]

- 10-bitové rozlišení
- Integrální nelinearita 0,5 LSB
- Absolutní přesnost ± 2 LSB
- Čas konverze 13 μ s-260 μ s
- 8 vstupních kanálů
- Rozsah vstupního napětí 0 až V_{cc}
- Volitelné referenční napětí 2,56 V nebo 1,1 V
- Přerušování na skončení A/D převodu

6 Návrh Hardware

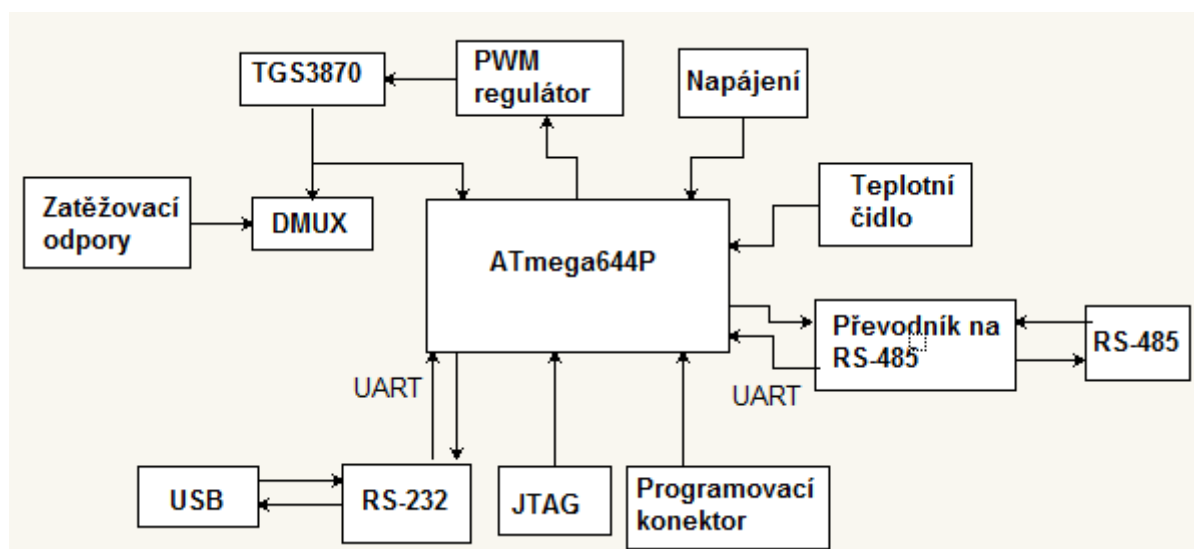
Tato kapitola je věnována celkovému návrhu hardwaru od blokového schématu až po funkční prototyp snímače toxických plynů. Jako první se stanoví přesné požadavky co má deska plošných spojů snímače obsahovat.

Specifikované zadání návrhu hardwaru:

Napájení desky plošných spojů bude realizováno z olověného 12 V akumulátoru. Snímač toxických plynů bude umístěn mimo desku plošných spojů. Komunikační protokol FINET je standardně realizován s přenosovou rychlostí 19200 b a proto bude dodržena tato rychlost. DPS bude obsahovat konektor komunikační sběrnice RS-485. Žhavení čidla bude probíhat pomocí PWM. Senzory Figaro jsou citlivá na přesnost, a proto se musí zavést zpětná vazba pro regulaci. Senzory Figaro jsou taky hodně závislá na teplotě a tudíž DPS musí obsahovat možnost teplotní kompenzace. Snímač musí obsahovat možnost zápisu do paměti přes USB.

6.1 Blokové schéma snímače

Jako srdce celého snímače je zvolen senzor Figaro TGS 3870, který umí měřit jak metan, tak i oxid uhelnatý. Při žhavení senzoru je potřeba, aby byl odpojen od zatěžovacího odporu. Při měření se pak musí připojit k zatěžovacímu odporu. Zatěžovací odpor je pro každý plyn jiný a proto je použit DMUX, ke kterému je připojena řada zatěžovacích odporů. Jako mozek celého snímače je použit mikrokontrolér ATmega 644P, který je napájen 5V. Generování žhavicího napětí se provádí pomocí PWM. Protože čidla Figaro jsou citlivá na přesnost žhavicího napětí, je zde zavedena zpětná vazba do mikrokontroléru, kde akční zásah zajistí PI algoritmus. Pro kompenzaci teploty je připojeno teplotní čidlo. ATmega 644P nemá pro komunikaci po RS-485 integrované rozhraní a proto je využito komunikace UART a převodníku na RS-485. Na desce plošných spojů je dále umístěn JTAG, programovací konektor a převodník pro komunikaci po RS-232 a USB.

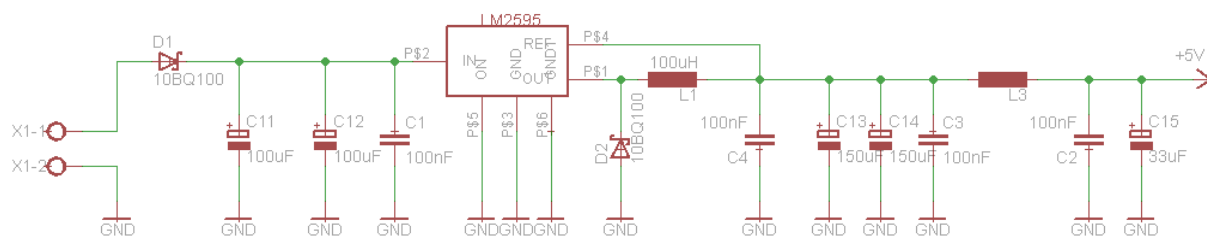


Obr. 6.1.1 Blokové schéma snímače

6.2 Schéma zapojení snímače

Napájení:

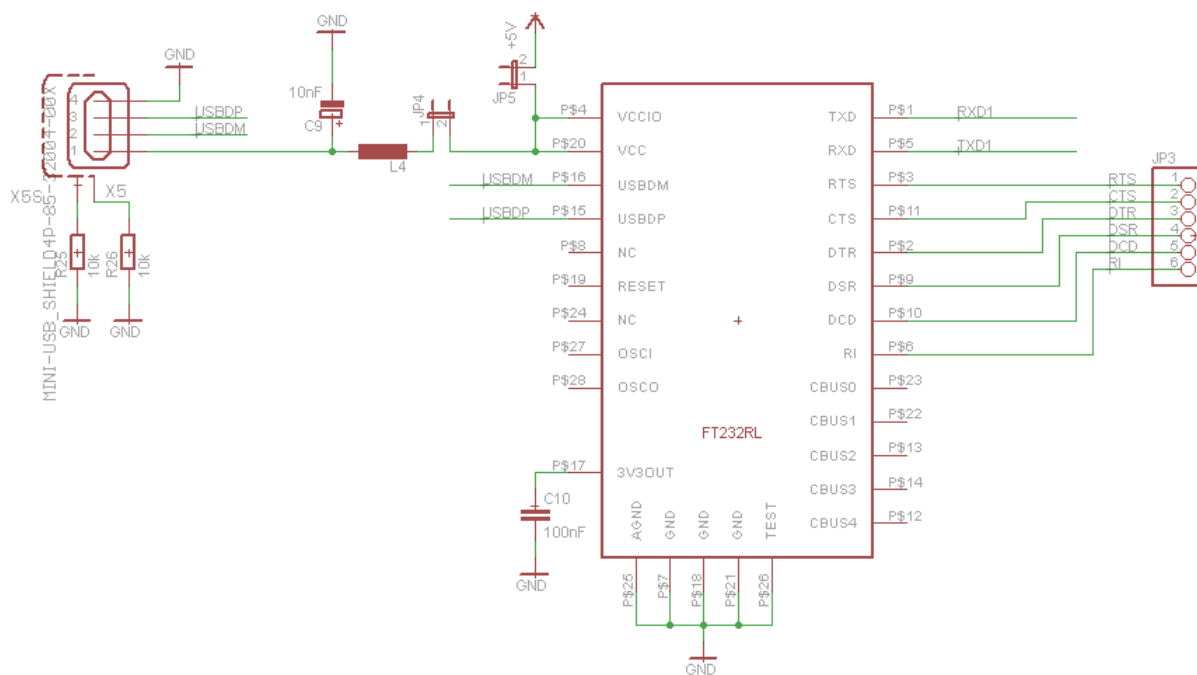
Zdrojem napájení je 12V olověný akumulátor, který je připojen na vstupní svorky X1. Jako stabilizační prvek je zvolen spínaný zdroj LM2595. Jeho výstupem je napětí 5V a propustí proud až 1A. Dioda D1 slouží jako ochrana proti přepólování. Filtrační, blokovací kondenzátory a indukčnosti jsou zapojeny podle doporučeného zapojení výrobce. Tato část obvodu je zobrazena na Obr. 6.2.1.



Obr. 6.2.1 Napájení snímače

USB s RS-232:

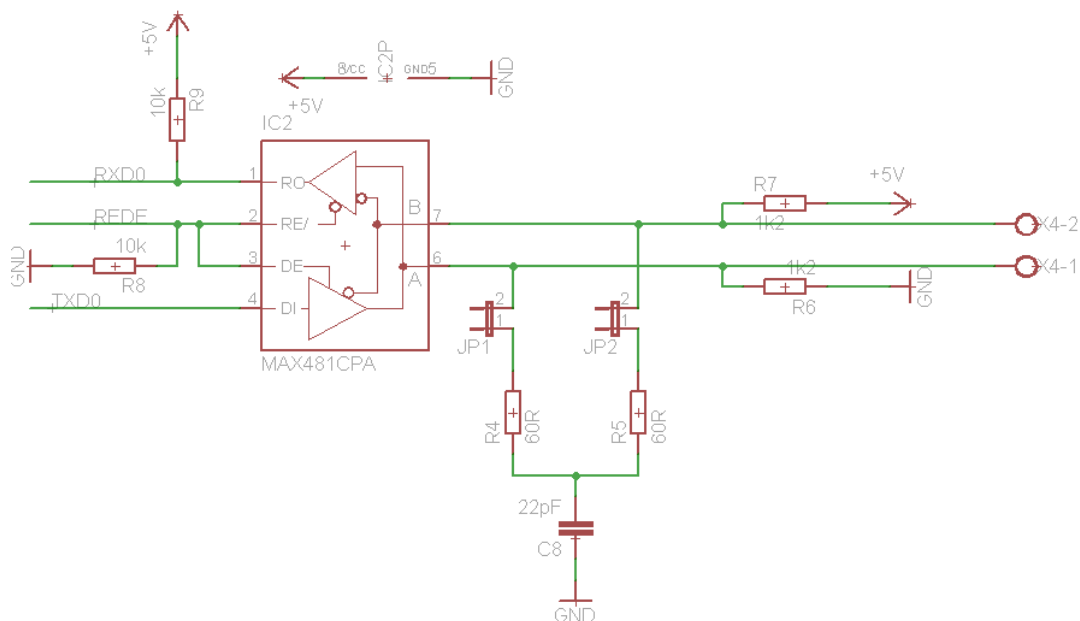
Pro zápis do paměti mikrokontroléru přes PC je využito převodníku FT232RL, který převádí komunikaci UART jak na USB komunikaci tak i na RS-232. FT232RL je taktéž zapojen podle doporučeného zapojení výrobce. Standardní konektor pro RS-232 není zapojen. Signály jsou vyvedeny pouze na pin-lištu. Pro komunikaci s PC přes konektor USB se musí připojit jumper JP4. Je zde zavedena i možnost napájení celé DPS přes USB připojením jumperu JP5. Toto zapojení je znázorněno na Obr. 6.2.2.



Obr. 6.2.2 Schéma komunikace po USB a RS-232

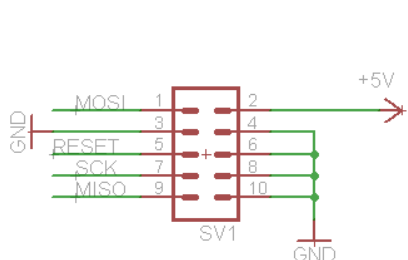
RS-485:

Sběrnice RS-485 nemá definovaný standardní konektor a tudíž je použit obyčejný konektor WAGO. Pro převod komunikace UART na RS-485 slouží převodník MAX485. Tento převodník je zapojen podle teoretické části a celé schéma je zobrazeno na Obr. 6.2.3.

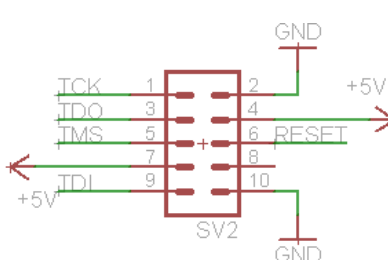


Obr. 6.2.3 Schéma komunikace RS-485

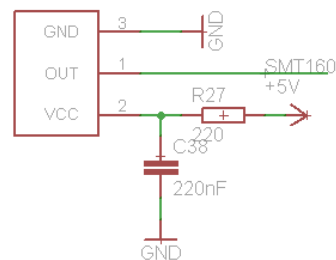
JTAG a programovací konektor jsou zapojeny podle standardu. Pro teplotní kompenzaci je použito teplotní čidlo SMT160, které generuje PWM signál o určité střídě v závislosti na teplotě. Tento generovaný signál má tu výhodu, že není potřeba žádného převodníku a mikrokontrolér může signál ihned zpracovat.



Obr. 6.2.4 Programovací konektor



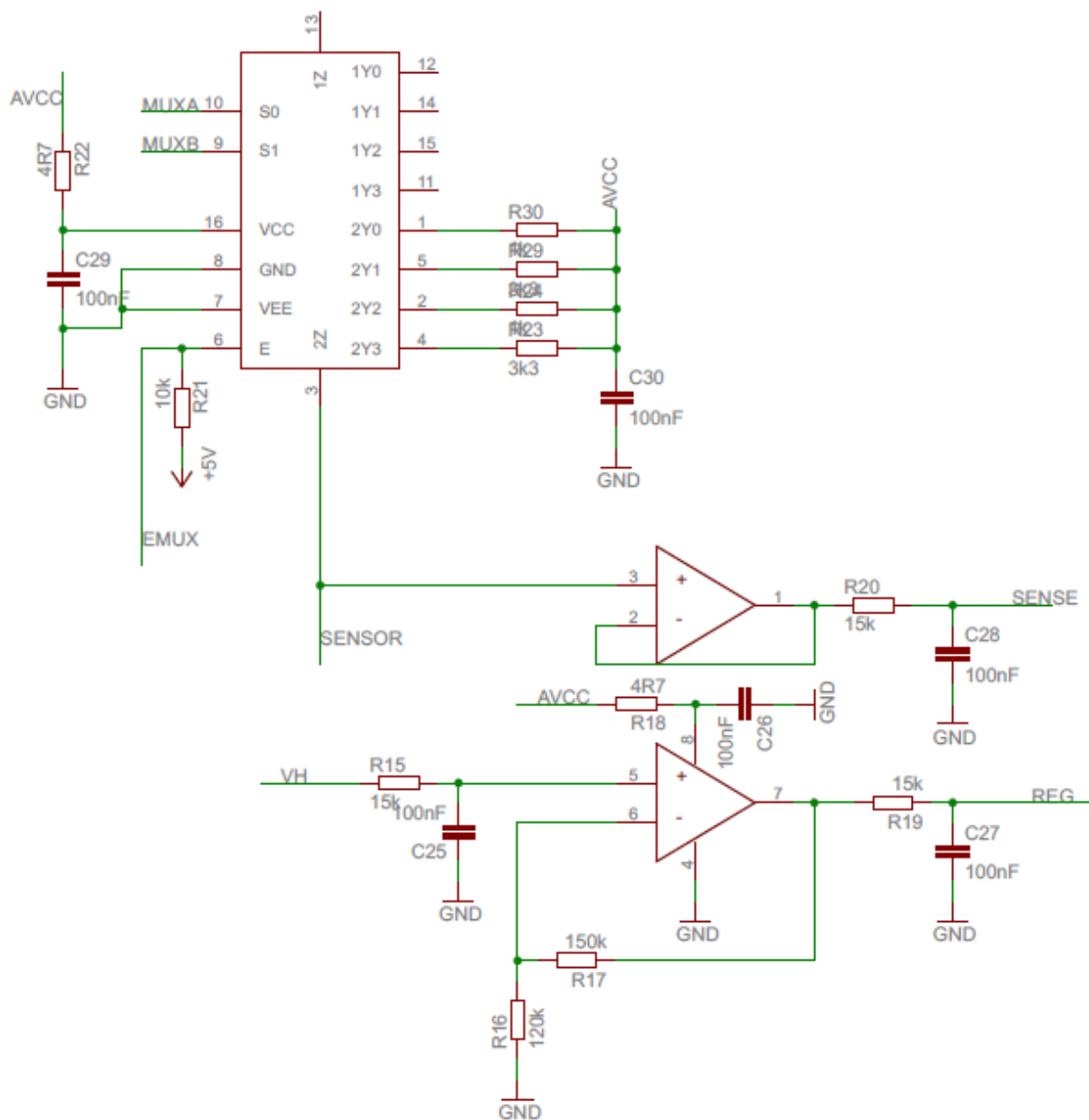
Obr. 6.2.5 JTAG



Obr. 6.2.6 Teplotní čidlo SMT160

Zapojení ATmegy644P:

K mikrokontroléru ATmega644P je připojeno resetovací tlačítko. Napájení mikrokontroléru musí být filtrováno a tudíž na každém napájecím pinu musí být umístěn filtrační kondenzátor umístěný co nejblíže k mikrokontroléru. Rychlost mikrokontroléru určuje oscilátor o hodnotě 16MHz. Všechny periferie jsou připojeny k příslušným pinům.



Obr. 6.2.9 Připojení zatěžovacích odporů

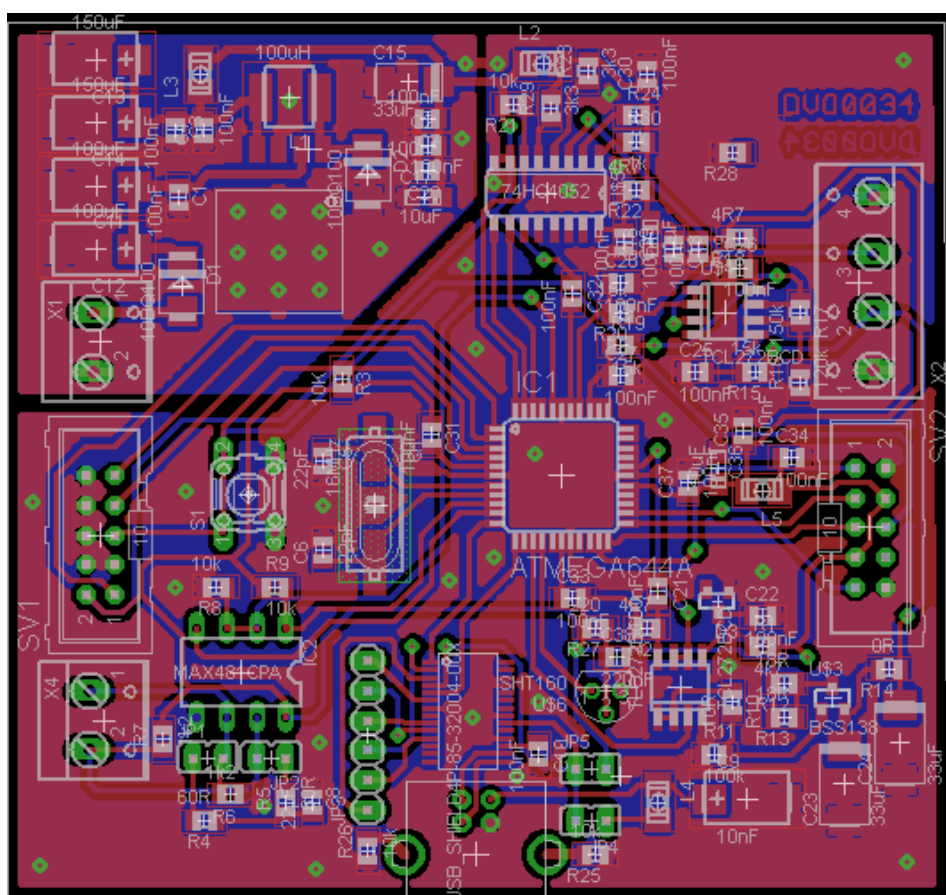
6.3 Výroba hardware

Na Obr. 6.3.1 je zobrazeno rozmístění součástek a vodivých cest. Na první pohled je zřejmé, že se jedná o dvouvrstvý plošný spoj. Všechny součástky jsou umístěny ve vrstvě TOP. Technologie použitých součástek je kombinovaná z důvodu miniaturizace (SMD) a praktičností pájení nebo nedostupnosti součástky v SMD provedení.

V návrhu je rozlišena digitální a analogová zem. Tyto země jsou odděleny isolační mezerou a spojeny v jednom bodě. Prokovy pod součástkami jsou realizovány z důvodu lepšího odvodu tepla a prokovy mimo součástky jsou realizovány z důvodu zamezení vzniku tzv. „Ostrovů“, tj. část desky bez polygonu (mědi). Signálové cesty v napájecí části mají šířku 0,8 mm (vlevo nahoře na Obr. 6.3.1) z důvodu možnosti velkého ztrátového výkonu. Ostatní signálové cesty mají šířku 0,4 mm.

Deska plošných spojů byla vyrobena ve firmě MARPOS.s.r.o. Osazena a zapájena byla ručně ve školní laboratoři.

V příloze D je zobrazen pohled na vrstvu TOP bez součástí a v příloze E je zobrazen pohled na vrstvu BOTTOM bez součástí.



Obr. 6.3.1 Výsledný návrh DPS

7 Vývoj Firmware

Tato kapitola se zabývá vývojem firmwaru pro funkční prototyp snímače. Jsou zde popsány všechny použité algoritmy, vývojové diagramy a ukázky klíčových částí firmwaru.

Pro funkčnost prototypu snímače toxických plynů s komunikací pomocí protokolu FINET jsou klíčové tři hlavní části firmwaru – samotná komunikace, žhavení čidla a získání naměřených hodnot. Kvůli teplotní závislosti senzoru je zde i rozpracovaná kompenzace teploty.

7.1 Atmel Studio 6.0

Atmel Studio je vývojové prostředí pro tvorbu kompletního programového vybavení mikrokontrolérů, mikroprocesorů a signálových procesorů AVR. Studio se skládá z textového editoru, kompilátoru, debuggeru, simulátoru a dalších nástrojů pro vývoj softwaru.

Vývoj firmwaru pro tuto práci byl vytvářen ve vývojovém prostředí Atmel Studio 6.0 pro mikrokontrolér ATmega 644P.

7.2 Komunikace pomocí protokolu FINET

Komunikace pomocí protokolu FINET je realizována sériovou asynchronní komunikací UART a převodníkem MAX485, který převede logické úrovně UARTu na logické úrovně komunikační sběrnice RS485.

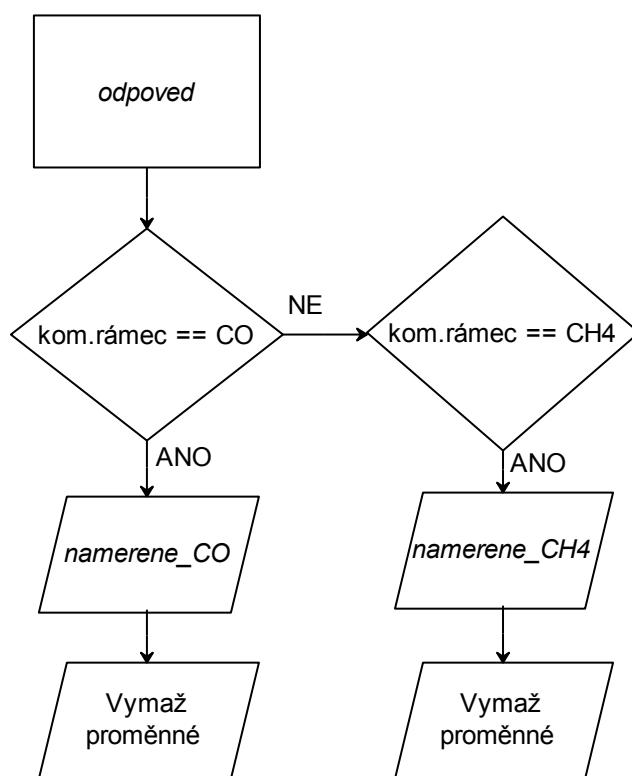
Pro zprovoznění komunikace je důležité správné nastavení komunikačních parametrů podle popisu protokolu v kapitole 4.3. Toto nastavení se provádí pomocí funkce *uart_init* vždy při zapnutí napájení. Nadřazená komunikační stanice má možnost komunikovat se snímačem vždy během určitých 10 minut a následně 20 sekund má možnost komunikace zakázanou z důvodu žhavení čidla a měření koncentrace plynů. Kdyby stanice měla možnost komunikace se snímačem povolenou kdykoliv, tak by výsledky měření byly nepoužitelné z důvodu krátkého žhavení senzoru nebo nevyčtení správné hodnoty měřeného napětí.

Komunikace pomocí protokolu FINET se skládá z několika funkcí:

- *ulozeni_ramce*
- *odpoved*
- *namerene_CO*
- *namerene_CH4*
- *rozklad_CO*
- *rozklad_CH4*
- *preved_CO_na_bajty*
- *preved_CH4_na_bajty*

Funkce *ulozeni_ramce* využívá interního přerušení na příjem bajtu, kde se přijaté bajty ukládají do definovaného pole tak dlouho, dokud nepřijde koncový znak komunikačního rámce (viz. kapitola 4.3). Jakmile je přijat koncový znak komunikačního rámce, je toto pole uloženo do proměnných, se kterými se dále pracuje.

Funkce *odpoved* porovnává správnost přijatého komunikačního rámce a klíčové parametry jako zdrojové a cílové adresy pro zjištění zda je dotaz určen tomuto snímači. Dále podle přijatých dat zjistí, co se od něj čeká za odpověď. Pokud jsou tyto podmínky splněny, vyvolá funkci *namerene_CO* nebo funkci *namerene_CH4*, které odešlou naměřené hodnoty buď oxidu uhelnatého, nebo metanu. Po odeslání naměřených hodnoty se vymažou proměnné, aby naměřené data odeslal pouze jednou a to vždy na vyžádání od nadřazené stanice. Vývojový diagram je zobrazen na Obr. 7.2.1.



Obr. 7.2.1 Odpověď na dotaz od nadřazené stanice

Funkce *rozklad_CO* je implementována do funkce *namerene_CO* a provádí přetypování datového typu float (norma IEEE-754) na 32bitové číslo, které se rozloží na 4 po sobě jdoucí bajty pomocí funkce *preved_CO_na_bajty*. Rozklad 32bitového čísla se provádí bitovým posunem o určitý počet bitů doleva nebo doprava, tak aby hodnota 32bitového čísla nebyla větší jako 255 (FF). Obdobně jsou implementovány funkce *rozklad_CH4* a *preved_CH4_na_bajty*.

7.3 Žhavení senzoru

Senzor TGS3870 se musí žhavit pro měření metanu 0,9 V po dobu 5 sekund a pro měření oxidu uhelnatého se senzor musí žhavit 0,2 V po dobu 15 sekund. Odchylka žhavicího napětí nesmí být větší jako $\pm 3 \%$ proto je nutné žhavicí napětí regulovat. Pro tuto regulaci byl zvolen PI regulátor (proporcionálně integrační regulátor). Pro návrh regulátoru je nutné znát přenos soustavy. Podle rovnice (6) je napsán PI algoritmus. Samotné žhavení je realizováno pomocí PWM o frekvenci 10kHz a zesilovače třídy D (viz. kapitola 6.2).

Přenos soustavy se určí podle vztahu:

$$G_{R(z)} = \frac{U_{(z)}}{E_{(z)}}$$
$$G_{R(s)} = \frac{U_{(s)}}{E_{(s)}} = \frac{K}{s}$$

Použije se zpětná obdélníková metoda (ZOBD) a dosadí se do přenosu soustavy:

$$s = \frac{z - 1}{T_z}$$
$$G_{R(z)} = \frac{K}{\frac{z - 1}{T_z}} = \frac{KT_z}{z - 1} * \frac{1}{\frac{1}{z}} = \frac{KT_z z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{U_{(z)}}{E_{(z)}}$$
$$E_{(z)} * KT_z z^{-1} = U_{(z)} * (1 - z^{-1})$$
$$K * T_z * e(k - 1) = u(k) - u(k - 1)$$
$$u(k) = K * T_z * e(k - 1) + u(k - 1) \quad (6)$$

,kde:

u ... akční veličina

e ... žádaná veličina

K ... rychlost regulace

T_z ... perioda vzorkování

Ukázka PI algoritmu:

```
signed int PS_regulace(signed int e,uint16_t Kr)
{
    //u_aktualni = Kr*e_minula+u_minula;
    u_aktualni = Kr*e+u_minula;
    u_minula = u_aktualni;
    e_minula=e;
}
```


7.4 Měření koncentrace plynů

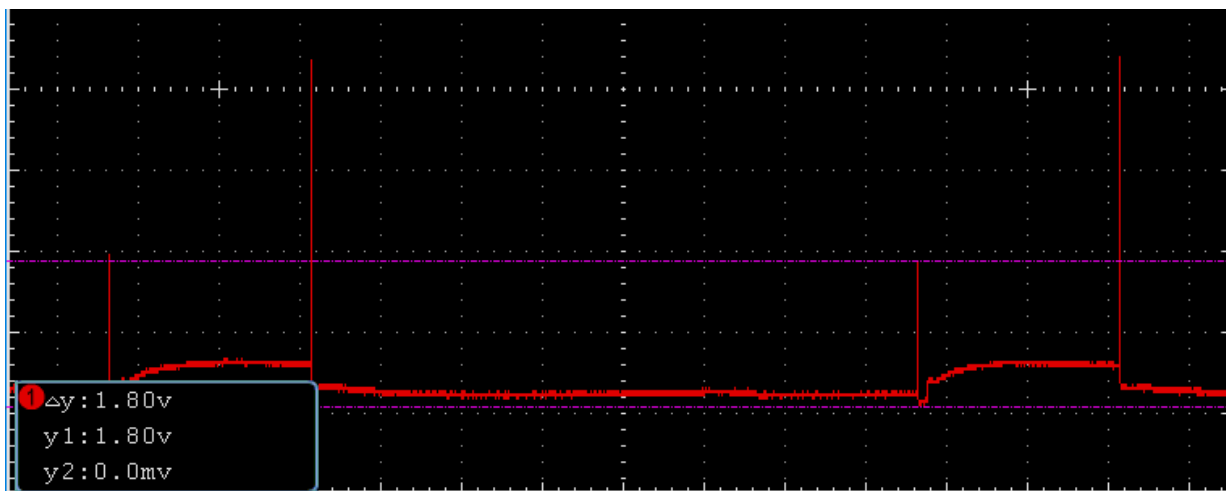
Před samotným měřením koncentrace plynů musí být senzor TGS3870 správně žhaven. Nejpresnější výsledky měření jsou 15 až 10 milisekund před koncem žhavení senzoru. Při měření musí být k senzoru připojen správný zatěžovací odpor (pro oxid uhelnatý je to $R_L=3,3\text{ k}\Omega$, pro metan je to $R_L=1\text{ k}\Omega$). Z datasheetu pro mikrokontrolér ATmega 644P je patrné, že A/D převod je správný až po druhém zkonvertovaném vzorku a tudíž první dvě měření musí být zahozena.

Ukázka části zdrojového kódu pro měření napětí na čidle v požadovaný čas:

```
if ((citac >= 19980) && (citac <= 19990))
{
    if (start_mereni==0)
    {
        Sense = konverze_ADC(0);
        Sense = konverze_ADC(0);
        pripoj_DMUX_2Y0();
        vypnout_PWM();
        start_mereni = 1;
    }
    else
    {
        Sense = konverze_ADC(0);
        SenseCelkem = SenseCelkem + Sense;
        i++;
    }
}
```

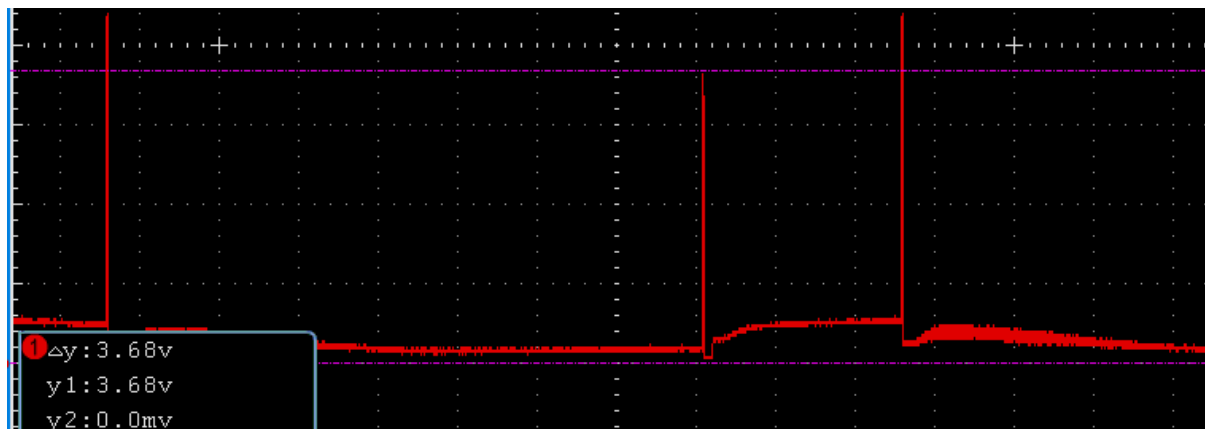
Z ukázkového kódu je patrné, že se hodnota napětí na senzoru měří 20 až 10 ms před koncem žhavení. To se děje z časových důvodů, aby měl mikrokontrolér čas zahodit první dva vzorky z AD převodníku.

Na Obr. 7.4.1 je zobrazena změřená správná odezva na měření a žhavení senzoru. První špička je minulé měření oxidu uhelnatého, kde za ní následuje křivka žhavení na 0,9 V pro měření metanu a následná špička je hodnota napětí změřené koncentrace metanu. Následné spadnutí hodnoty napětí je žhavení senzoru pro oxid uhelnatý 0,2 V a dále se celé měření a žhavení senzoru opakuje.



Obr. 7.4.1 Změřená správná odezva na měření a žhavení senzoru TGS3870

Na Obr. 7.4.2 je zobrazena změřená špatná odezva na měření a žhavení senzoru, kde je vidět, že každá změřená špička má dvě různé hodnoty napětí. Pokud AD převodník stihne tyto hodnoty změřit, bude do měření zanesena chyba.



Obr. 7.4.2 Změřená špatná odezva na měření a žhavení senzoru TGS3870

Popis ukázkového kódu:

Když bude čítač v rozmezí 20 až 10 milisekund před koncem žhavení a proměnná *start_mereni* bude rovna 0, první dva vzorky z AD převodníku se zahodí a *start_mereni* se nastaví do jedničky a po zbytek času se bude přičítat do proměnné *SenseCelkem* hodnota AD převodníku. Je zde nastaven větší čas pro měření, než je definován na začátku kapitoly z důvodu potřeby změřením dvou vzorků navíc a jejich zahození.

Použité funkce:

- *konverze_ADC(0)* – převede napětí na senzoru připojeného na kanál 0 na digitální hodnotu.
- *pripoj_DMUX_2Y0* – podle logické tabulky (Tabulka 1) se nastaví vstupy demultiplexoru a tím připojí požadovaný zatěžovací odpor.
- *vypnout_PWM* – zajistí vypnutí PWM a tím sníží hodnotu šumu měřeného signálu

Po změření hodnoty napětí na senzoru se musí vypočítat koncentrace plynů. Jelikož je závislost napětí na koncentraci plynů nelineární, musí se provést linearizace, která je podrobně popsána v kapitole „Kalibrace“. Zde je zobrazena část zdrojového kódu pro výpočet koncentrace metanu, založená na principu: „Když je napětí v určitých mezích, počítej koncentraci daným způsobem“.

```
void vypocet_CH4ppm ()
{
.
.
    if ((SenseCelkem > 244) && (SenseCelkem <=338))
    {
        CH4ppm = ((-34 * SenseCelkem) + 13592);
    }
.
.
}
```

7.5 Měření teploty pomocí čidla SMT160

SMT160 je teplotní čidlo, kterým lze změřit teplotu za pomoci jednoho výstupního pinu mikrokontroléru. Teplota je převedená na střidu výstupního logického signálu (7):

$$DC = 0,32 + 0,0047 * t \quad (7)$$

,kde:

t ... teplota ve stupních celsia

DC ... střída výstupního signálu o frekvenci 1 – 4 kHz

Měření teploty je složeno ze tří funkcí:

- `init_pro_mereni_teploty` – slouží pro reinicializaci `Timer1`, který je využíván pro realizaci PWM
- `mereni_teploty` – slouží pro změření šířky PWM a periody potřebné pro výpočet teploty
- `vypocet_teploty` – slouží pro výpočet teploty ze změřené šířky PWM a periody pomocí vzorce číslo 7

Ukázka části zdrojového kódu pro měření teploty:

```
void mereni_teploty ()
{
  TCCR1B = (TCCR1B ^ 0b01000000); // nastaveni sledovani hrany signalu
  nova_zmena_hrany = ICR1; // zapis zmeny hrany signalu ICR1 do promene
  if (TCCR1B & 0b01000000) // mereni sirky pasma PWM a periody signalu
  {
    sirkaPWM = (nova_zmena_hrany - minula_zmena_hrany); // mereni sirkyPWM pri prechodu z
    nabezne hrany na sestupnu
  }
  else
  {
    perioda = (nova_zmena_hrany - minula_zmena_hrany); // mereni periody pri prechodu z nabezne
    hrany na dalsi
    minula_zmena_hrany = nova_zmena_hrany; // nova zmena se stava minulou
  }
}

void vypocet_teploty ()
{
  strida = ((sirkaPWM*200)/perioda); // strida v procentach x2
  teplota = (((strida -64)*2000)/47)/4; // vypocet vysledne teploty pri referenci 0°C
}
```

7.6 Zápis dat do EEPROM

Pro rychlou změnu adresy zařízení nebo měřicího kanálu slouží možnost zápisu do paměti EEPROM pomocí USB. Tato funkce je zde implementována proto, aby se nemuselo zasahovat do firmwaru. EEPROM je elektricky mazatelná a energeticky nezávislá paměť.

Pro zápis byl vytvořen specifický komunikační rámec, který je zobrazen v Tabulka 3 Tabulka 3, kde 0-255 je hodnota adresy snímače, 0-16 je číslo měřicího kanálu a znak „O“ nebo „M“ znamená oxid nebo metan. Rozlišení oxidu nebo metanu je důležité protože hodnoty obou koncentrací plynů nemůžou být na jednom měřicím kanálu. Po správném zadání a zapsání snímač odešle odpověď „OK“, při chybě odešle řetězec znaků „ŠPATNĚ“.

Tabulka 3: Komunikační rámec pro nastavení adresy

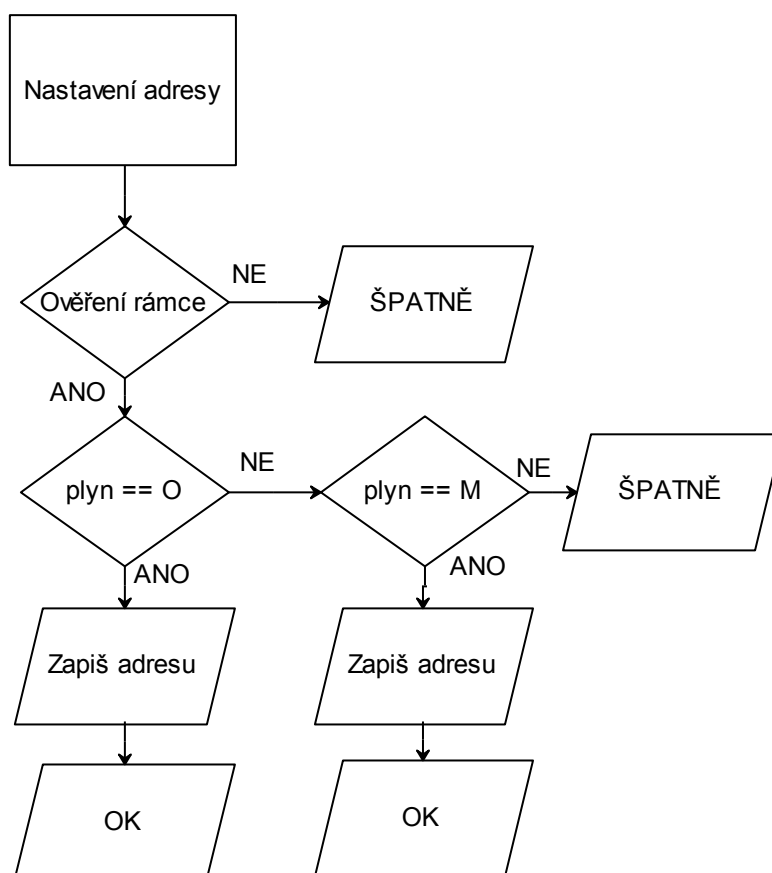
A	D	R	:	0-255	,	0-16	,	O,M	;
---	---	---	---	-------	---	------	---	-----	---

V Tabulka 4 je komunikační rámec v hexadecimálních hodnotách.

Tabulka 4: Komunikační rámec pro nastavení adresy v hexa soustavě

41	44	52	3A	0-FF	2C	0-10	2C	4F, 4D	3B
----	----	----	----	------	----	------	----	--------	----

Na Obr. 7.6.1 je zobrazen vývojový diagram zápisu dat do EEPROM:



Obr. 7.6.1 Vývojový diagram zápisu dat do EEPROM

7.7 Popis hlavního programu

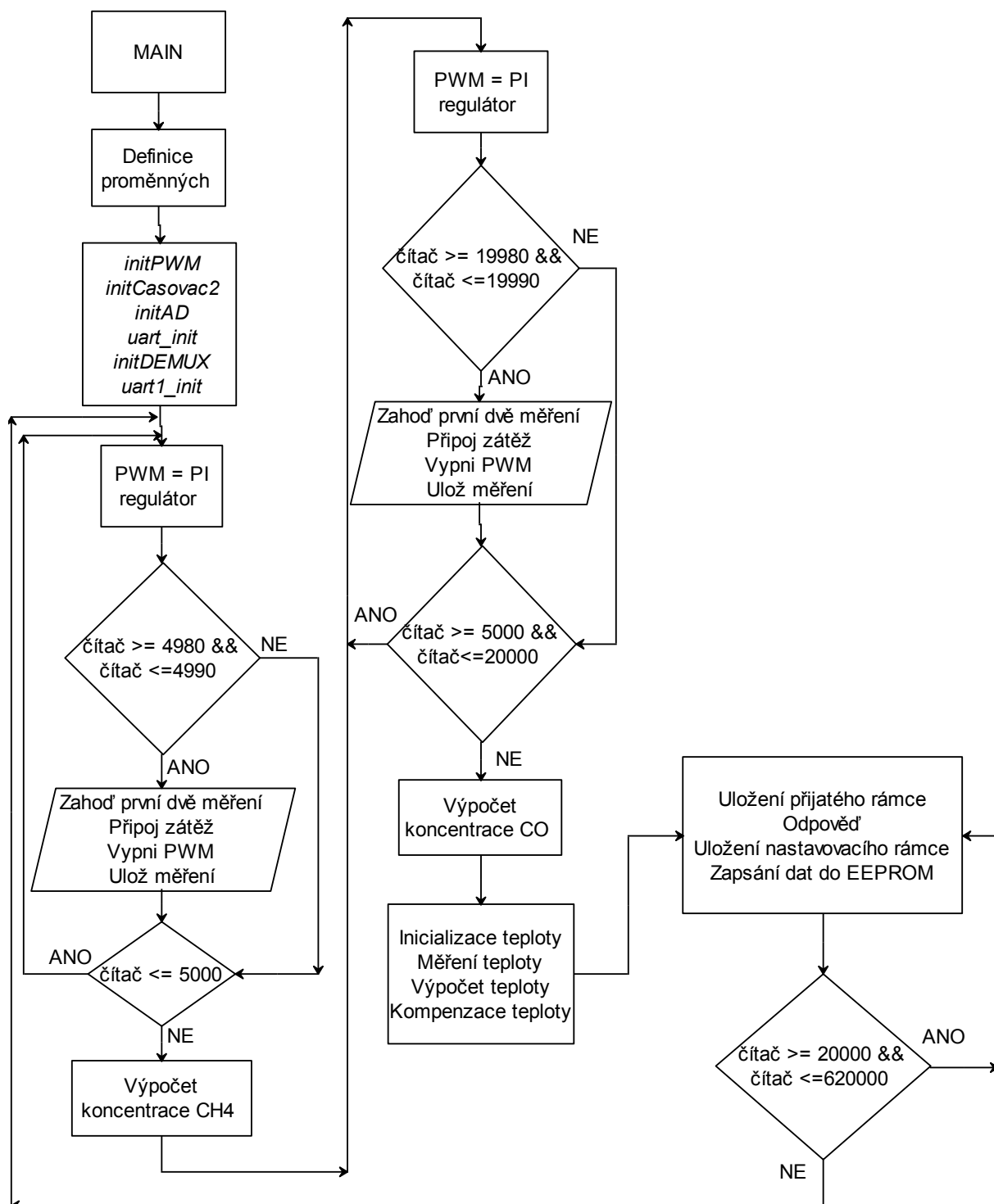
Hlavní program začíná definicí veškerých proměnných, včetně vnoření potřebných knihoven ať už vlastních nebo standardních. Následuje inicializace a nastavení všech potřebných periférií. Poté se zavolá PI regulátor, který se bude 5 sekund (5000 ms) starat o žhavení senzoru 0,9 V pomocí PWM. Když bude čas v rozmezí 4980 až 4990 ms, připojí se přes demultiplexer zatěžovací odpor o hodnotě 1 k Ω . AD převodník začne měřit výstupní napětí na senzoru TGS3870 a první dva změřené vzorky bude ignorovat. Zbytek změřených hodnot se sečte a vydělí počtem změřených vzorků. Podle rovnice (8) a místa kde se nachází změřená hodnota na zlinearizované charakteristice na Obr. 8.2.1 se vypočítá výsledná koncentrace metanu.

Znovu je spuštěn PI regulátor s tím rozdílem, že tentokrát je žhavicí napětí 0,2 V získané pomocí změny PWM a čas regulace je od 5 do 20 sekund (5000 ms až 20000 ms). Demultiplexor připojí zatěžovací odpor o hodnotě 3,3 k Ω v době od 19980 až 19990 ms. Změření a výpočet probíhá obdobně jako u metanu s tím rozdílem, že se použije zlinearizovaná charakteristika pro měření CO na Obr. 8.1.1.

Po výpočtu koncentrace oxidu uhelnatého je zde možnost zavést teplotní kompenzaci, kvůli značné teplotní závislosti senzoru TGS3870. Pro změřenou teplotu se musí inicializovat *Timer1*, který je použit pro generování PWM signálu. Jiný časovač se nemůže použít, protože *Timer1* jako jediný ze tří *Timerů* je 16 bitový a podporuje funkci Input Capture pro změřenou teplotu. Následně se změří teplota pomocí změřenou středy PWM, které vstupuje z teplotního čidla do procesoru na pin Input Capture. Poté se vypočte teplota a provede se změna koncentrace plynů v závislosti na změřené teplotě.

Po zjištění výsledné koncentrace obou plynů je zapnuta možnost komunikace s nadřazenou stanicí po dobu 10 minut, ve kterých si může vyžádat tyto změřené koncentrace. Je zde i možnost pomocí PC přes USB nastavit adresu snímače i adresu, na který kanál je připojen a který plyn na něm měří. Po uplynutí 10 minut se celý program opakuje.

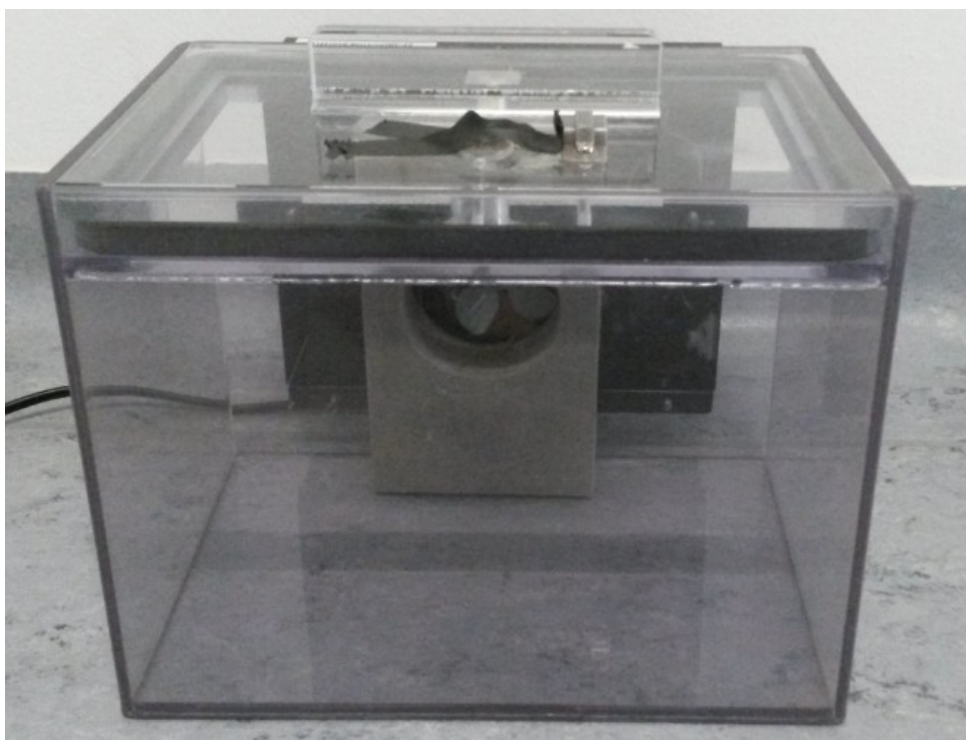
Vývojový diagram celého hlavního programu je zobrazen na Obr. 7.7.1.



Obr. 7.7.1 Vývojový diagram hlavního programu

8 Kalibrace

Kalibrace snímače plynů je velmi důležitá protože od ní se odvíjí přesnost měřených koncentrací daných plynů obzvláště, když závislost čidla není lineární a proto se musí změřit charakteristika závislosti koncentrace plynu na výstupním napětí. Pro měření musí být vytvořeny co neideálnější podmínky. Teplota by měla být 20 °C, vlhkost 65 % a co nejčistější ovzduší. Jako přesné měřidlo byl použit iBrid MX6 (verze 3.52.04). Měřilo se v plynové komoře viz. Obr. 7.8.1.

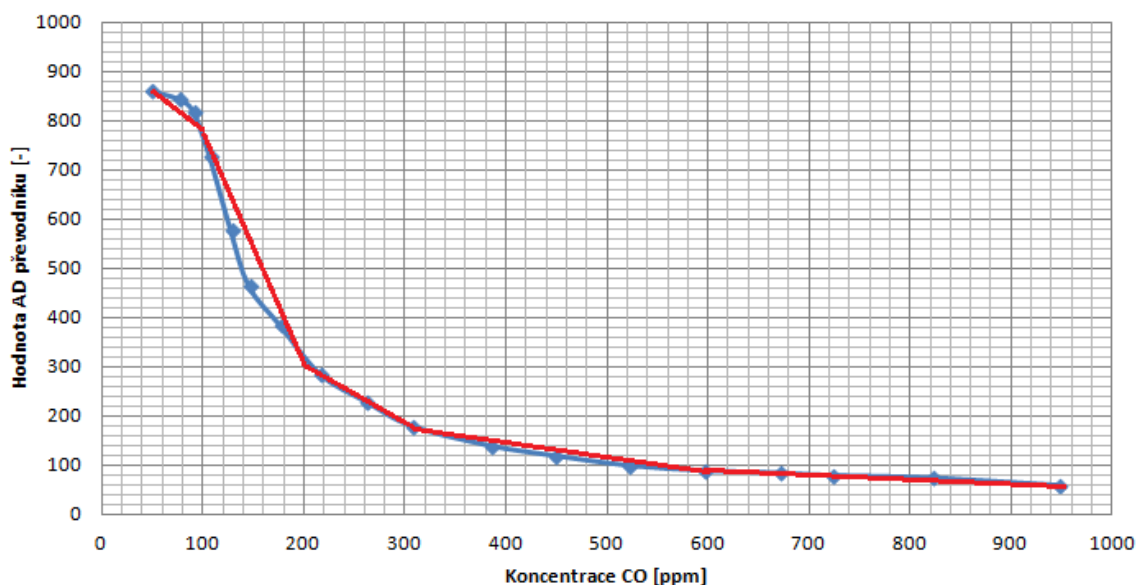


Obr. 7.8.1 Plynová komora

8.1 Kalibrace oxidu uhelnatého

Pro kalibraci senzoru na měření oxidu uhelnatého se musí zjistit charakteristika závislosti koncentrace plynu na výstupním napětí (hodnotě A/D převodníku). Ta se zjistí tak, že se do plynové komory napustí plyn a vloží se do ní přesný měřicí přístroj (iBrid MX6) a navržený snímač. Změřené skutečné koncentraci se přiřazuje hodnota A/D převodníku. Hodnota A/D převodníku se zjistí tak, že se upraví firmware tak, aby odesílal nadřazené stanici pouze změřenou hodnotu a neprováděl s ní žádné přepočty. Po změření této charakteristiky se musí co nejpřesněji linearizovat. Na linearizaci a správném změření této charakteristiky se odvíjí přesnost budoucího měření oxidu uhelnatého. Tato charakteristika je zobrazena na Obr. 8.1.1. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze A. Modře je znázorněna změřená kalibrační charakteristika a červeně je zobrazena zlinearizovaná kalibrační charakteristika. Chyby při následném měření budou největší v největších odchylkách těchto charakteristik.

Kalibrace oxidu uhelnatého

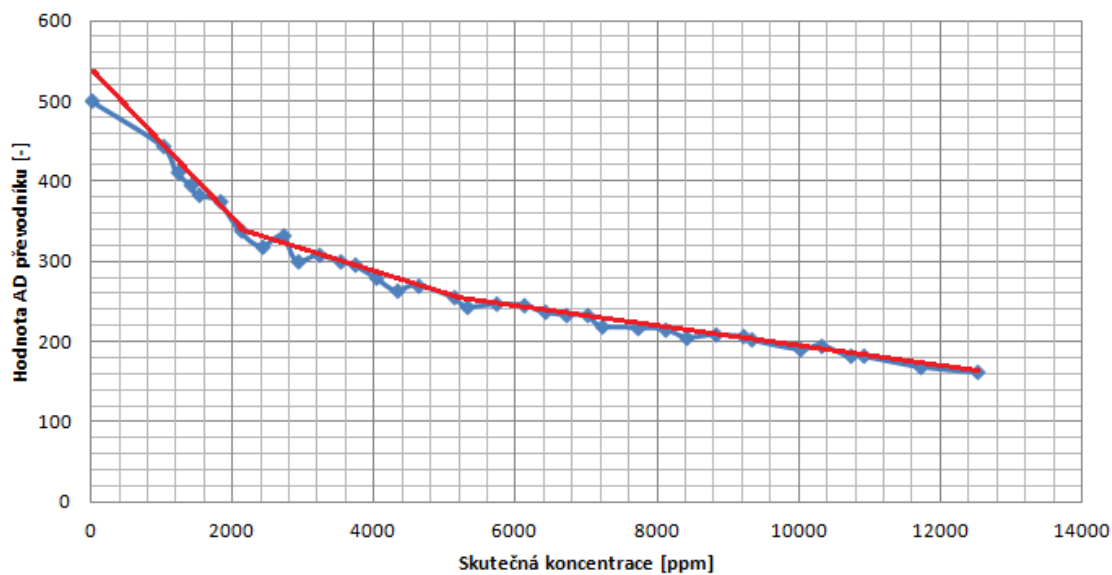


Obr. 8.1.1 Linearizace závislosti výstupu AD převodníku na koncentraci CO

8.2 Kalibrace metanu

Pro kalibraci senzoru na měření metanu platí stejné podmínky jako pro kalibraci oxidu uhelnatého s jediným rozdílem a to měřeným plynem. Potřebná charakteristika je zobrazena na Obr. 8.2.1. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze B. Modře je znázorněna změřená kalibrační charakteristika a červeně je zobrazena zlinearizovaná kalibrační charakteristika. Chyby při následném měření budou největší v největších odchylkách těchto charakteristik.

Kalibrace metanu



Obr. 8.2.1 Linearizace závislosti výstupu AD převodníku na koncentraci CH₄

8.3 Linearizace převodních charakteristik

Kalibrační charakteristiky pro linearizaci jsou v příloze C. Tyto charakteristiky se proloží několika přímkami tak, aby se co nejvíce přizpůsobila kalibrační křivce. Zde platí pravidlo čím více přímek, tím přesnější kopírování kalibrační charakteristiky a tudíž větší přesnost následného měření. Proložené (zlinearizované) charakteristiky jsou zobrazeny na Obr. 8.1.1 a Obr. 8.2.1.

Výpočet kalibračních konstant a celkové hodnoty koncentrace se provede pomocí jednoduché rovnice přímky (8):

$$y = ax + b \quad (8)$$

Podle zvolených přímek na kalibračních charakteristikách se zvolí koncové body přímky. Například na kalibrační charakteristice metanu Obr. 8.2.1 je zvolena přímka v rozmezí koncentrace metanu od 2100 – 5300 ppm. Hodnotě koncentrace CH₄ 2100 ppm je rovna hodnota AD převodníku 338. Hodnotě koncentrace CH₄ 5300 ppm je rovna hodnota AD převodníku 244. Tímto jsou definovány koncové body přímky:

A = [338,2100] , B = [244,5300]

Z těchto bodů a rovnice přímky se vytvoří soustava dvou rovnic o dvou neznámých a vypočítají se konstanty a, b :

$$\begin{aligned} 338a + b &= 2100 \\ \underline{244a + b &= 5300} \\ 338a + b &= 2100 \\ \underline{-244a - b &= -5300} \\ 94a &= -3200 \\ a &= -34 \\ 338a + b &= 2100 \rightarrow b = 2100 - (338 * (-34)) = 13592 \end{aligned}$$

Vypočítané konstanty se dosadí do rovnice přímky (9):

$$y = -34x + 13592 \quad (9)$$

Z této rovnice se vypočítá celková koncentrace metanu v rozmezí od 2100 ppm do 5300 ppm, kde:

y... hodnota koncentrace plynu

x... výstup z A/D převodníku

Obdobným způsobem se vypočítají konstanty pro všechny linearizační přímky.

9 Testování

Pro ověření úspěšnosti kalibrace následuje testování. Obdobně jako u kalibrace zde musí být vytvořeny co nepodobnější podmínky jako při kalibraci. Pokud by byly jiné, do měření by se zanesla chyba a měření by bylo zkresleno.

Po změření koncentrace obou plynů se naměřené hodnoty uloží do Tabulka 5 pro lepší přehled a následné výpočty. Pro zjištění přesnosti snímače toxických plynů se musí stanovit absolutní a relativní chyby jednotlivých měření.

Absolutní chyba měřené koncentrace plynů Δ je definována jako absolutní hodnota rozdílu skutečné koncentrace plynů a měřené koncentrace plynů viz. rovnice (10):

$$\Delta = |\textit{Skutečná} - \textit{Naměřená}| \text{ [ppm]} \quad (10)$$

,kde:

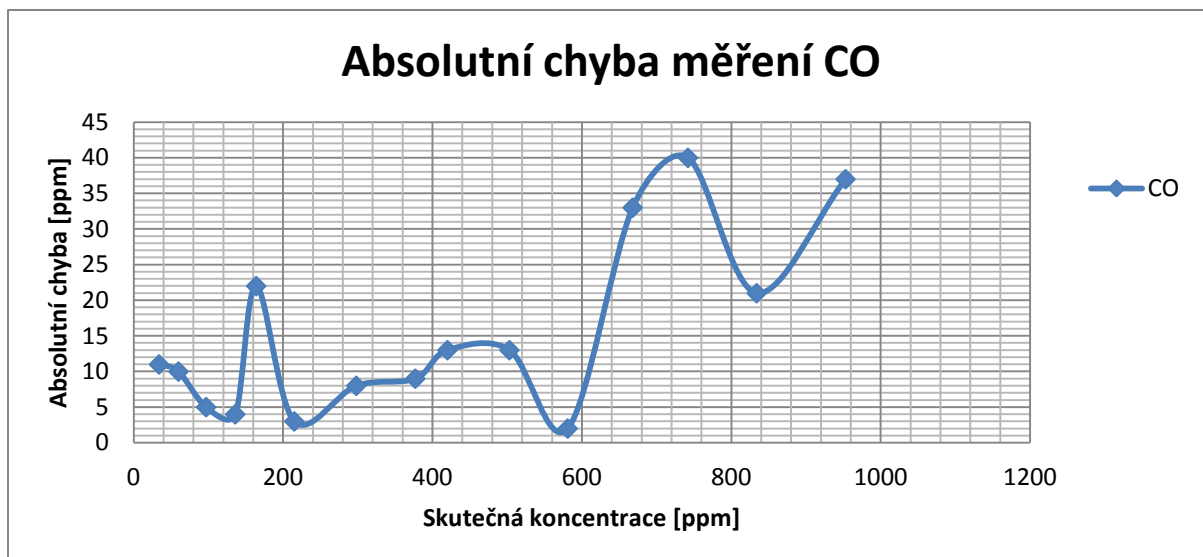
Skutečná – naměřená hodnota koncentrace plynů přesným měřidlem v tomto případě iBrid MX6

Naměřená – naměřená hodnota koncentrace plynů testovaným snímačem

Relativní chyba měřené koncentrace plynů δ je definována jako poměr absolutní chyby měření koncentrace plynů Δ k absolutní hodnotě skutečné koncentrace plynů. Pro procentuální vyjádření relativní chyby se výsledná hodnota musí násobit 100 viz. rovnice (11):

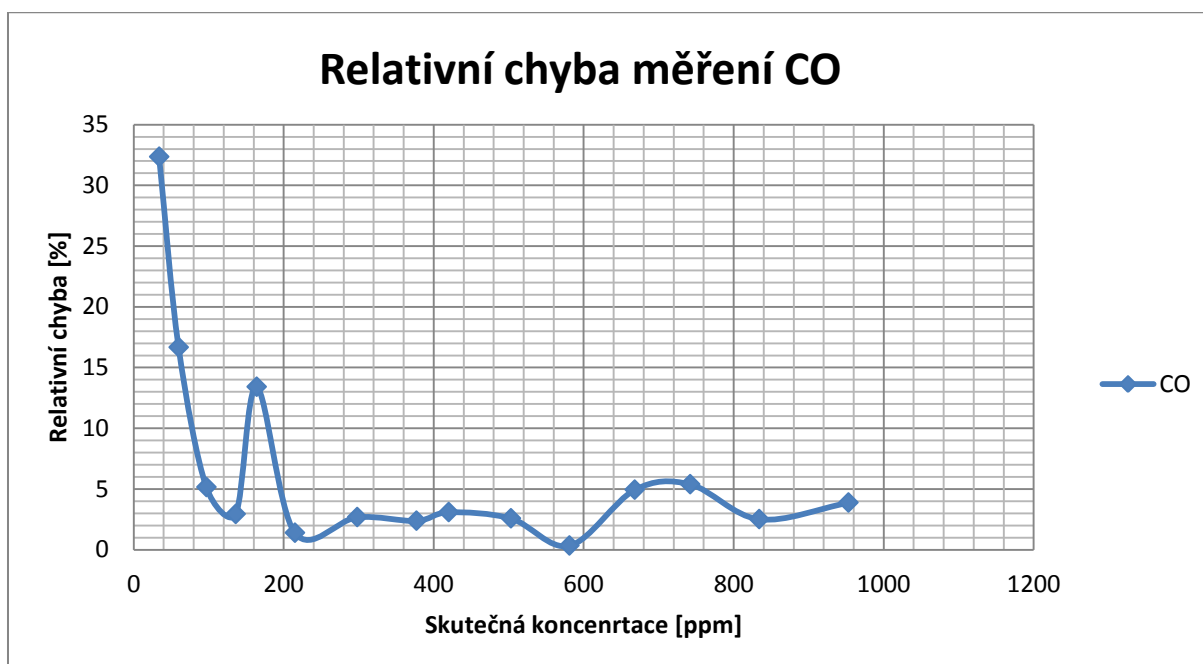
$$\delta = \frac{\Delta}{|\textit{Skutečná}|} * 100 \text{ [%]} \quad (11)$$

Na Obr. 9.1 je zobrazena absolutní chyba měření oxidu uhelnatého, kde je vidět že se snižující se koncentrací oxidu uhelnatého se snižuje i absolutní chyba měření. To je podmíněno tím, že při vyšších koncentracích se odpor senzoru TGS3870 mění jen v desetinách Ω (příloha F) tudíž rozmezí koncentrace 600 až 1000 ppm CO je definováno napětím několik desítek mV. Jelikož je použit pouze 10 bitový A/D převodník, je zde měření hodně zkresleno.



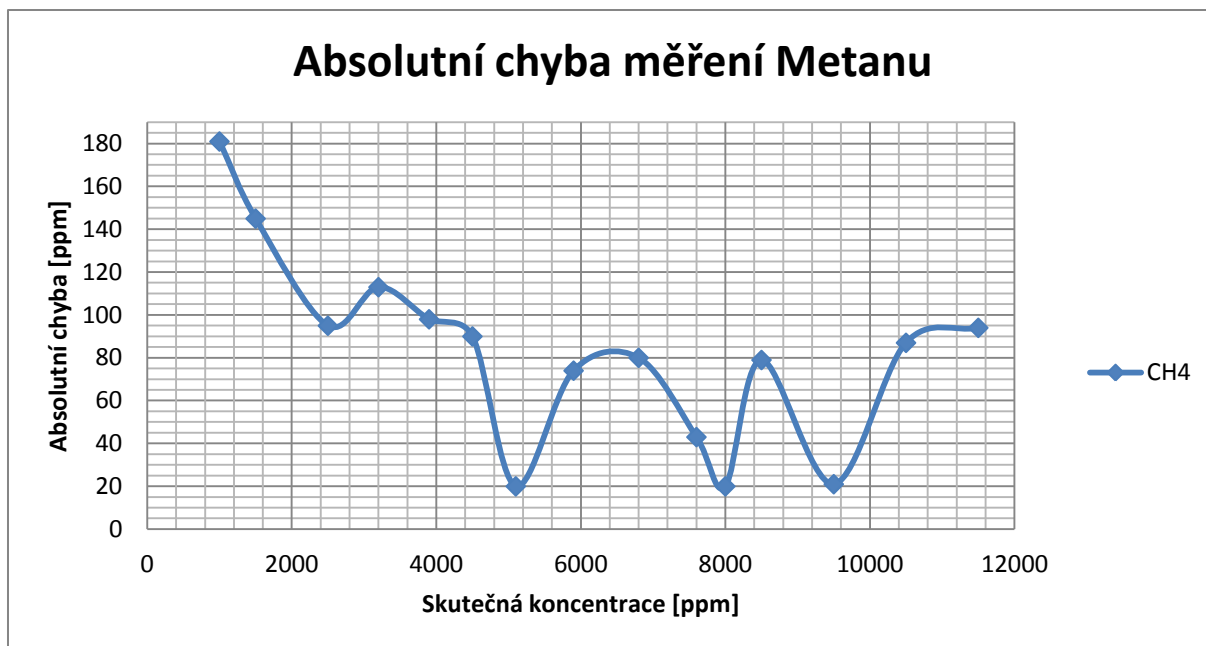
Obr. 9.1 Absolutní chyba měření CO

Na Obr. 9.2 je zobrazena relativní chyba měření oxidu uhelnatého, kde je vidět velmi velká relativní chyba v nízkých koncentracích oxidu uhelnatého. Ta je způsobena velkým zlinearizováním kalibrační křivky.



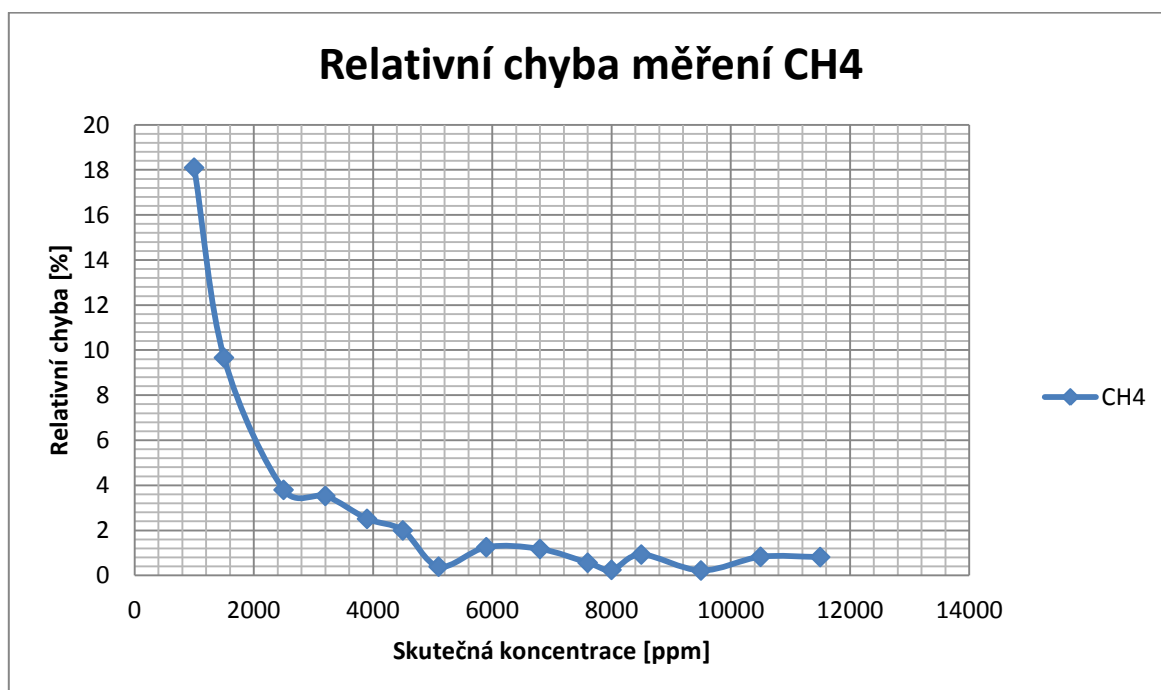
Obr. 9.2 Relativní chyba měření CO

Na Obr. 9.3 je zobrazena absolutní chyba měření metanu, kde je vidět, že při velmi nízké koncentraci absolutní chyba měření roste. To je způsobeno mezní hodnotou měřicího rozsahu senzoru TGS3870 viz. příloha F a taktéž mezní hodnotou rozsahu přesného měřidla iBrid MX6.



Obr. 9.3 Absolutní chyba měření CH₄

Na Obr. 9.4 je zobrazena relativní chyba měření metanu, kde je vidět, že testovaný senzor má docela velkou přesnost v porovnání s přesným měřidlem iBrid MX6 pokud se nebude brát v úvahu mezní hodnota rozsahu senzoru TGS 3870.



Obr. 9.4 Relativní chyba měření CH₄

Tabulka 5: Testovací měření CO a CH₄

Oxid uhelnatý		Metan		Absolutní chyba		Relativní chyba	
iBrid MX6	Testovaný snímač	iBrid MX6	Testovaný snímač	CO	CH ₄	CO	CH ₄
[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[%]	[%]
953	916	11500	11594	37	94	3,882476	0,817391
834	813	10500	10587	21	87	2,517986	0,828571
742	702	9500	9521	40	21	5,390836	0,221053
668	635	8500	8579	33	79	4,94012	0,929412
581	579	8000	7980	2	20	0,344234	0,25
503	490	7600	7643	13	43	2,584493	0,565789
420	433	6800	6880	13	80	3,095238	1,176471
377	368	5900	5974	9	74	2,387268	1,254237
298	290	5100	5080	8	20	2,684564	0,392157
215	212	4500	4410	3	90	1,395349	2
164	186	3900	3802	22	98	13,41463	2,512821
136	140	3200	3087	4	113	2,941176	3,53125
97	102	2500	2405	5	95	5,154639	3,8
60	70	1500	1355	10	145	16,66667	9,666667
34	45	1000	819	11	181	32,35294	18,1

10 Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval problematikou měření oxidu uhelnatého a metanu s komunikací pomocí protokolu FINET. Je zde rozvedena problematika využití periférií mikrokontroléru ATmega 644P, protokol FINET, návrh hardwaru, PI regulátoru, firmwaru a kalibrační metody. Absolvováním těchto problematik jsem si zopakoval celé studium a rozvinul teoreticky nabitě vědomosti a získal jsem tak cenné zkušenosti v oblasti návrhu měřicího systému od nastudování problematiky až po vytvoření plně funkčního zařízení.

Hardware navržený podle kapitoly 6 je zcela funkční. Malý problém nastal s diodou D3, která je ve schématu zapojena dvouvodičově, přitom její pouzdro je třívodičové. Tento problém jsem vyřešil pootočením diody a připájením správných vývodů diody na správné piny na desce plošných spojů. Při návrhu komunikace po USB jsem vycházel ze zapojení výrobce převodníku FT232RL. Výrobce se zřejmě dopustil chyby v zapojení. Chyba spočívá buď ve špatné kapacitě kondenzátoru, a nebo v provedení kondenzátoru. Místo elektrolytického kondenzátoru C9 o kapacitě 10 nF jsem připájel obyčejný kondenzátor o kapacitě 10 nF.

Navržený firmware je zcela funkční a vyhovující pro laboratorní měření. Pro zapojení do měřicího systému se musí odladit funkce *identy*, která je na přiloženém CD naprogramována, ale není funkčně odladěna a testována. Dále se musí do funkce *odpoved* naprogramovat podmínka, kdy se vyvolá funkce *identy*. To se realizuje porovnáním správných proměnných podle definice funkce *identy* v protokolu FINET. Pro měření v jiných podmínkách než laboratorních se musí vypočítat teplotní konstanty a dosadit do připraveného firmwaru. Konstanty pro navrhovaný PI regulátor byly zvoleny metodou pokus omyl, protože změření přenosu soustavy by bylo velmi časově náročné.

Při linearizaci kalibračních charakteristik jsem předpokládal, že největší chyby měření budou v rozmezí, kde linearizační přímka nekopíruje přesně změřenou kalibrační charakteristiku. Tento předpoklad se potvrdil viz. Obr. 8.1.1 a Obr. 9.1 pro oxid uhelnatý, Obr. 8.2.1 a Obr. 9.3 pro metan.

Podle Tabulka 5 se může stanovit přesnost, s jakou navržený snímač měří jednotlivé plyny. Když se zanedbají spodní rozsahy měřených plynů, tak bude třída přesnosti pro měření oxidu uhelnatého $\pm 14\%$ a pro měření metanu $\pm 5\%$. Zanedbáním spodních rozsahů se nic zásadního nestane, protože to jsou tak malé koncentrace plynů, že i profesionální měřicí přístroj je jen obtížně měří.

Menší chyby měření mohou být způsobeny mnoha a mnoha drobnostmi, na které bych rád upozornil. První a asi nejdůležitější je ta, že při měření oxidu uhelnatého, A/D převodník nikdy nenaměřil maximální hodnotu svého rozsahu (1024) i když koncentrace CO byla nulová a hodnota napětí na výstupu čidla byla 5 V. Domnívám se, že je to způsobeno delším měřením výsledné hodnoty napětí, než jak je uvedeno od výrobce senzoru viz Obr. 7.4.2. Delší měření (20 až 10 ms před koncem žhavení) jsem zvolil proto, že A/D převodník musí změřit a poté zahodit 2 měření z důvodu špatnosti převodu. Tento problém by se vyřešil zkrácením měřené doby na dobu uvedenou výrobcem a to 15 až 10 ms před koncem žhavení. Poté by se měla zvýšit i přesnost měření.

Další drobností je použití integrovaného 10 bitového A/D převodníku. Jelikož se široká koncentrace plynu mění jen v pěti desetínách Ω , je tento převodník nedostačující a musí se použít externí 16 bitový A/D převodník. Další drobností pro zvýšení přesnosti je zvýšení počtu měřených bodů pro kalibraci a zvýšení počtu linearizačních přímků na proložení kalibrační charakteristiky.

Snímač toxických plynů jsem navrhl jako univerzální a tudíž by neměl být problém připojit buď jiný senzor pro měření stejných plynů, nebo i jiný senzor pro měření jiných plynů. Po připojení jiného senzoru se bude muset změnit firmware, protože každé čidlo bude fungovat trochu jinak.

Navržený snímač je vhodný pro orientační měření oxidu uhelnatého a metanu s komunikací pomocí protokolu FINET, vzhledem k jeho nízké přesnosti měření. I kdyby tento snímač měl velmi vysokou přesnost měření, byl by pořád vhodný pouze pro orientační měření, protože senzor TGS 3870 má velmi nízký měřicí rozsah měřených plynů. Například metan je výbušný od 44000 ppm do 150000 ppm a proto by bylo vhodné jej měřit v rozsahu 1000 ppm do 50000 ppm, ale senzor dokáže měřit pouze do 12500 ppm.

V budoucnu se může tento snímač vylepšit přidáním externího 16 bitového A/D převodníku, dopočítáním teplotních konstant a přidáním více funkcí protokolu FINET. Vhodné by bylo uvažovat i nad malým chladičem mikrokontroléru, protože při delším měření (například kalibraci) se znatelně zahřívá. Na přiloženém CD je nahrán plně funkční firmware vytvořený v Atmel Stuidu 6.0 a je přiložen i návrh desky plošných spojů a celé schéma snímače vytvořené v Eaglu 5.7.0.

Seznam použité literatury

- [1] Methan, *Wikipedie: Otevřená Encyklopedie [online]*. Naposledy editována 20.9.2013, [cit. 2014-1-7]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Methan>
- [2] Oxid Uhelnatý, *Wikipedie: Otevřená Encyklopedie [online]*. Naposledy editována 2.12.2013, [cit. 2014-1-7]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_uhelnat%C3%BD
- [3] AD převodník, *Wikipedie: Otevřená Encyklopedie [online]*. Naposledy editována 4.7.2013, [cit. 2014-1-7]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/?title=A/D_p%C5%99evodn%C3%ADk
- [4] GODZISZEWSKI, Ed, *Technical information for TGS3870*. Vydáno 28.3.2002, [cit. 2014-7-1]. Dostupné z: <http://biakom.com/pdf/TGS3870.pdf>
- [5] Figaro Engineering Inc, *Evaluation Module for TGS3870 – EM3870*. Vydáno 27.7.2007, [cit. 2014-7-1]. Dostupné z: http://www.figaro.co.jp/en/data/pdf/20130226105922_80.pdf
- [6] FIEDLER-MÁGR, *Popis komunikačního protokolu FINET*. Vydáno 15.8.2009, [cit. 2014-1-7]. Dostupné z: <http://www.fiedler-magr.cz/sites/default/files/dokumenty/apl-101.pdf>
- [7] MÁGR, Zdeněk, *Popis sériové komunikace MS16 - Sondy*. Vydáno 13.8.2010, [cit. 2014-1-7]. Dostupné z: magr@fiedler-magr.cz, nebo fiedler@fiedler-magr.cz
- [8] ATMEL CORPORATION, *ATmega644P*. Vydáno 28.2.2013, [cit. 2014-1-7]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-8011-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega164P-324P-644P_datasheet.pdf
- [9] TŮMA, Ondřej, *Plusně šířková modulace*. Vydáno 6.11.2011, [cit. 2014-1-7]. Dostupné z: http://www.linuxsoft.cz/article.php?id_article=1878
- [10] Pulsně šířková modulace, *Wikipedie: Otevřená Encyklopedie [online]*. Naposledy editována 4.11.2013, [cit. 2014-1-7]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzn%C4%9B_%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1_modulace
- [11] ZAWIN, *Programujeme AVR v jazyku C – 5.část*. Vydáno 29.2.2012, [cit. 2014-1-7]. Dostupné z: <http://svetelektro.com/clanky/programujeme-avr-v-jazyku-c-5-cast-456.html>
- [12] RS-485, *Wikipedie: Otevřená Encyklopedie [online]*. Naposledy editována 5.5.2013, [cit. 2014-1-7]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/RS-485>
- [13] USART, *Wikipedie: Otevřená Encyklopedie [online]*. Naposledy editována 7.4.2013, [cit. 2014-1-7]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/USART>
- [14] UART, *Wikipedia: The Free Encyclopedia [online]*. Last modified on 13.12.2013, [cit. 2014-1-7]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Universal_asynchronous_receiver/transmitter
- [15] VALÚCH, Daniel, *Digitálne signály*. Vydáno 10.9.2002, [cit. 2014-1-20]. Dostupné z: http://www.radia.sk/citaren/ako-funguje-radio/668_digitalne-signaly.html
- [16] FIEDLER, Jindřich, *Manuál M4016G*. Vydáno 10.4.2014, [cit. 2014-4-25]. Dostupné z: http://fiedler-magr.cz/sites/default/files/dokumenty/m4016_manual-v116_0.pdf

Seznam příloh

Seznam příloh	I
Přílohy.....	II
A. Tabulka závislosti výstupu AD převodníku na koncentraci CO	II
B. Tabulka závislosti výstupu AD převodníku na koncentraci CH ₄	III
C. Kalibrační charakteristiky pro linearizaci.....	IV
D. Pohled na vrstvu TOP bez součástek.....	V
E. Pohled na vrstvu BOTTOM bez součástek	VII
F. Závislost odporu senzoru TGS3870 na koncentraci plynů.....	VII
G. Naměřená hodnota koncentrace iBridem MX6	VIII
H. Naměřená hodnota koncentrace testovaným snímačem	IX
I. Seznam součástek.....	X

Přílohy

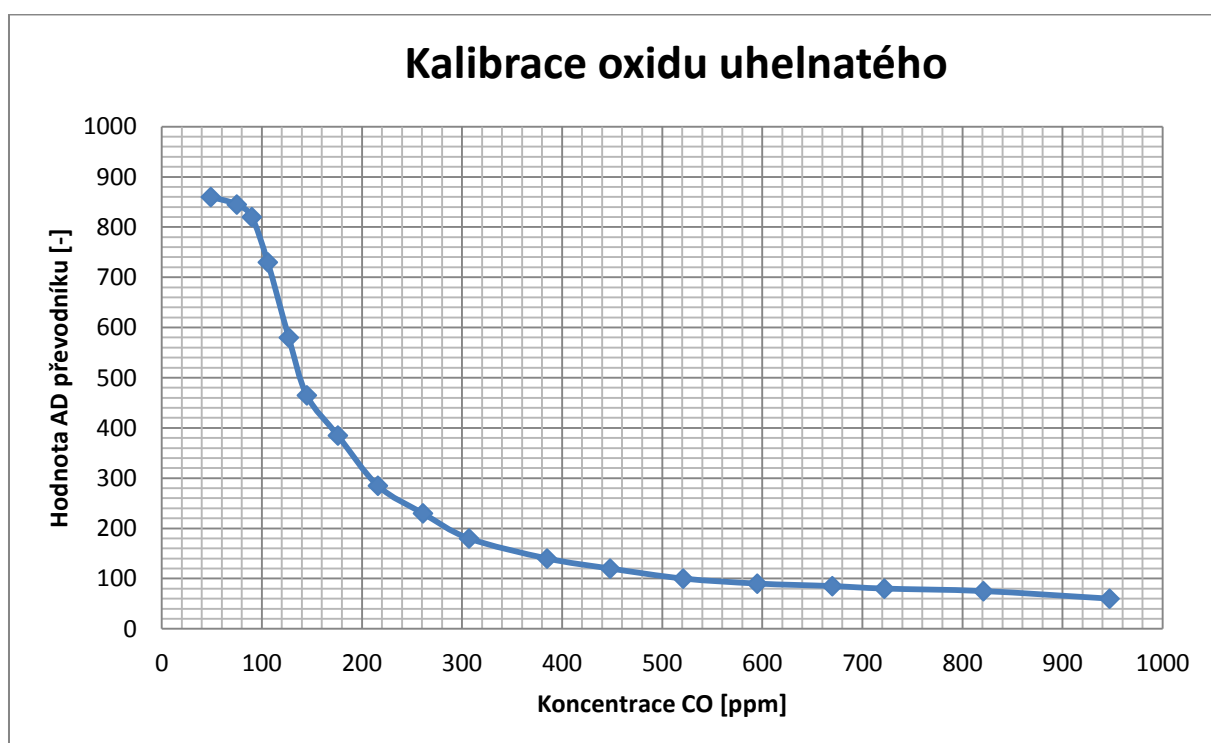
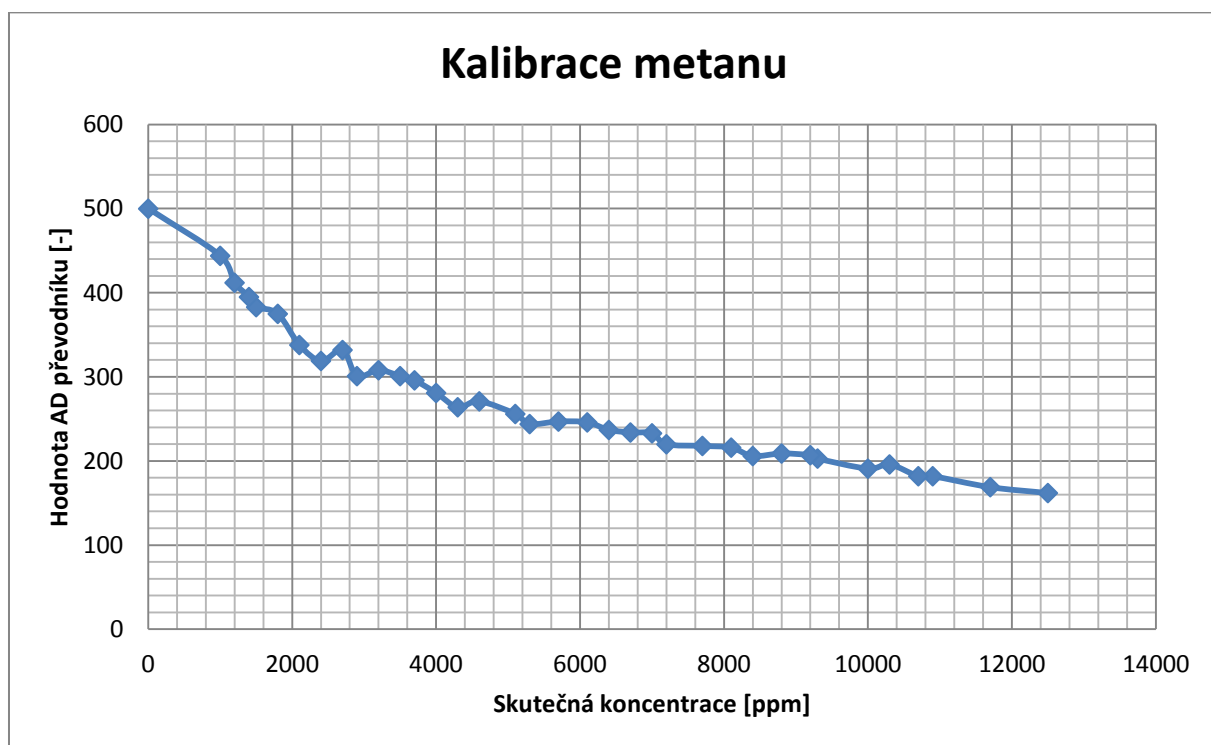
A. Tabulka závislosti výstupu AD převodníku na koncentraci CO

Koncentrace CO	Výstup AD převodníku
[ppm]	[-]
49	860
75	845
90	820
106	730
127	580
145	465
176	385
216	285
261	230
307	180
385	140
448	120
521	100
595	90
670	85
722	80
821	75
947	60

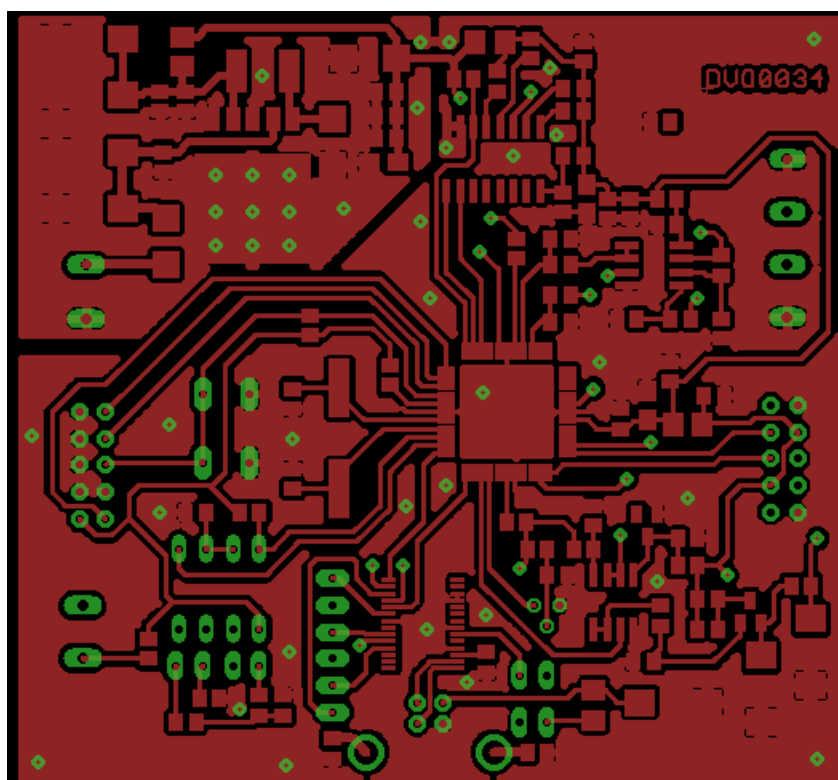
B. Tabulka závislosti výstupu AD převodníku na koncentraci CH₄

Koncentrace CH ₄	Výstup AD převodníku
[ppm]	[-]
12500	162
11700	169
10900	182
10700	182
10300	196
10000	191
9300	203
9200	207
8800	209
8400	206
8100	216
7700	218
7200	220
7000	233
6700	234
6400	237
6100	246
5700	247
5300	244
5100	256
4600	271
4300	264
4000	281
3700	296
3500	301
3200	308
2900	301
2700	332
2400	319
2100	338
1800	375
1500	383
1400	395
1200	412
1000	444
0	500

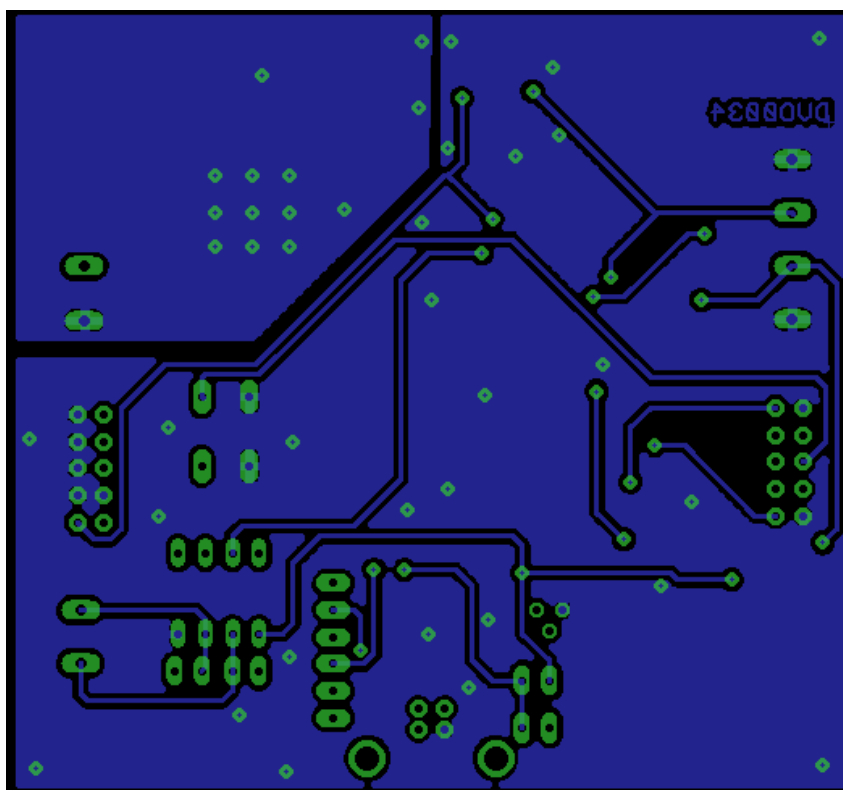
C. Kalibrační charakteristiky pro linearizaci



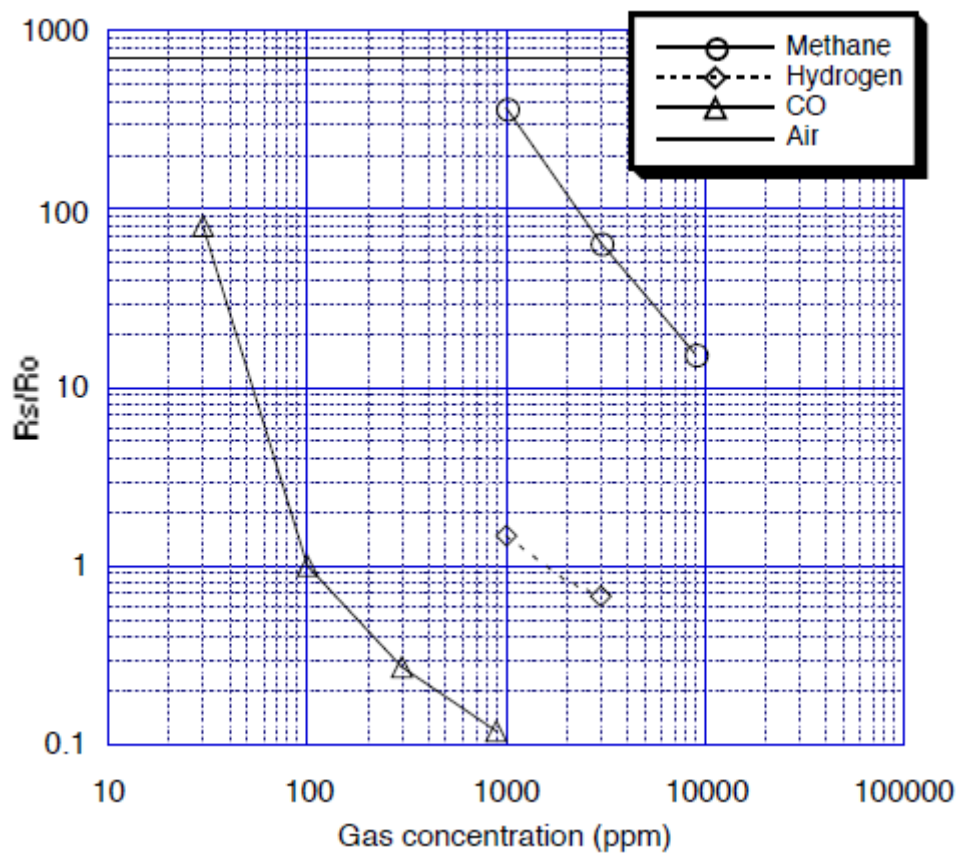
D. Pohled na vrstvu TOP bez součástek



E. Pohled na vrstvu BOTTOM bez součástek



F. Závislost odporu senzoru TGS3870 na koncentraci plynů



G. Naměřená hodnota koncentrace iBridem MX6



H. Naměřená hodnota koncentrace testovaným snímačem

Hlavní informace

Kanály A Kanály B Stav přístroje Relé

CO	52	[ppm]
CH4	6880	[ppm]
Teplota	23	[°C]
Napětí AKU	11.98	[V]

OK Storno Použít Nápověda

I. Seznam součástek

Kondenzátory:

pouzdro 0805:

C1, C2, C3, C4, C7, C10, C18, C19, C20	100 nF
C21, C22, C25, C26, C27, C28, C29, C30	100 nF
C31, C32, C33, C34, C35, C37	100 nF
C9	10 nF
C38	220 nF
C5, C6, C8	22 pF

elektrolyty:

C11, C12	100 μ F
C13, C14	150 μ F
C15, C23, C24	33 μ F
C16, C17, C36	10 μ F

Odpory:

pouzdro 0805

R1	4,7 k Ω
R2, R18, R22	4,7 Ω
R4, R5	60 Ω
R3, R8, R9, R21, R25, R26	10 k Ω
R6, R7	1,2 k Ω
R10	10 Ω
R11	100 k Ω
R12, R13	18 Ω
R15, R19, R20	15 k Ω
R16	120 k Ω
R17	150 k Ω
R27	220 Ω
R23, R29	3,3 k Ω
R24, R30	1 k Ω

Polovodiče:

D1, D2	10BQ100	Schottkyho dioda
D3		Zenerova dioda
U3	BSS138	SOT23

Indukčnosti a feritové jádra:

L1	100 μ H	L5650M
L2, L3, L4, L5		L3225P

Integrované obvody:

IC1	ATmega644P	TQFP44
IC2	MAX481CPA	DIL08

U1	FT232RL	SSOP
U2	LM2595	TO-263
U4	TCL272BCD	SO8
U5	74HC4052	SO16
U6	SHT160	TO92

Ostatní součástky:

Q1	16 MHz	Oscilátor
JP1, JP2, JP3, JP4, JP5	Pinhead + Jumper	
SV1, SV2	Konektory 10 pinové	
S1	Tlačítko	
X1, X2, X4	Wago svorky	
X5	USB konektor	